

**WIRKUNG VON POLLUTANTIEN UND
EINFLÜSSE DES WALDSTERBENS AUF
GENERATIVE ENTWICKLUNGSSTADIEN
VON PICEA ABIES (KARST.) L.
UND ANDEREN PINACEAE**

ELKE KRUG

~~1989~~

Disbui. München

1989



**Wirkung von Pollutantien und
Einflüsse des Waldsterbens
auf generative Entwicklungsstadien
von *Picea abies* (Karst.) L. und anderen Pinaceae**

**Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
der Forstwissenschaftlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität
zu München**

vorgelegt von

Elke Krug

1988

1. Berichterstatter: Prof. Dr. P. Schütt
2. Berichterstatter: Prof. Dr. A. v. Schönborn
Tag der mündlichen Prüfung: 21.2.1989

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

1.	Einleitung	1
2.	Material und Methoden	5
2.1	Pollenaufbereitung und Pollenkeimung	5
2.1.1	Pollenernte und -gewinnung	5
2.1.2	Pollenlagerung und -akklimatisierung	6
2.1.3	Pollenkeimung <i>in vitro</i>	6
2.1.3.1	Keimsubstrate	6
2.1.3.2	Standardkeimverfahren	7
2.1.3.3	Meßverfahren	7
2.1.3.4	Herstellung von Dauerpräparaten	8
2.2	Einfluß allgemeiner Umweltbedingungen auf das Pollenschlauchwachstum <i>in vitro</i>	9
2.2.1	Luftfeuchte	9
2.2.1.1	Bei unbewegter Luft	9
2.2.1.2	Bei strömender Luft	10
2.2.2	Temperatur	11
2.2.3	Licht	11
2.2.4	pH-Wert	11
2.2.5	Kontamination durch Mikroorganismen	12
2.3	Wirkung verschiedener Pollutantien auf die <i>in vitro</i> Pollenkeimung	14
2.3.1	Im Wasser gelöste Pollutantien	14
2.3.2	Elektromagnetische Wellen und Felder	17
2.3.3	Luftschadstoffe	21
2.3.3.1	Vorversuch mit SO ₂ und O ₃ , einzeln und in Kombination	21
2.3.3.2	SO ₂ -Begasung	22
2.3.3.3	O ₃ - und NO ₂ -Begasung	26
2.3.3.4	Autoabgase	28
2.3.3.5	Hochdosierte NO _x -Begasung	30
2.4	Bestäubungsversuch	32
2.4.1	Auswahl und Standort der Mutterbäume	33
2.4.2	Pollengewinnung und -präparation	34
2.4.3	Begasung des trockenen Pollens	34
2.4.4	Bestäubung	37
2.4.5	Auswertung	38

2.5	Freilanderhebungen	39
2.5.1	Wahl der Probeflächen	39
2.5.2	Schadansprache	42
2.5.3	Vorversuch zur Erntemethode	42
2.5.4	Einfluß von Umweltfaktoren auf die Pollenkeimung	43
2.5.4.1	Einfluß kleinstandörtlicher Unterschiede	43
2.5.4.2	Einfluß der Exposition	44
2.5.4.3	Schwankungen innerhalb der Baumkrone	45
2.5.4.4	Einfluß des Reifegrads der Blüte	45
2.5.5	Ermittlung des Zapfenbehangs und der Samenvitalität	46
2.6	Statistische Auswertung	47
3.	Ergebnisse	49
3.1	Pollenkeimung unter verschiedenen Versuchsbedingungen	49
3.1.1	Relative Luftfeuchtigkeit	50
3.1.2	Lufttemperatur	53
3.1.3	Licht	54
3.1.4	pH-Wert	56
3.2	Wirkungen chemischer und physikalischer Pollutantien auf die Pollenkeimung	60
3.2.1	Im Wasser gelöste Stoffe	60
	- Triethylblei	61
	- Lösliche Fraktion von Autoabgasen	61
	- Chlorkohlenwasserstoffe	62
	- H_2O_2	63
3.2.2	Elektromagnetische Wellen und Felder	66
	- Spektralbereich des sichtbaren Lichts	67
	- UV-Strahlung	67
	- Ultrakurzwellen	68
	- Elektrisches Hochspannungsfeld	68
	- Röntgenstrahlen	70
	- Radar	73
3.2.3	Gase	77
3.2.3.1	Vorversuch	77
3.2.3.2	SO_2	79
3.2.3.3	O_3 und NO_2	86
3.2.3.4	Autoabgase und NO_x	90

3.3	Wirkung von SO ₂ -behandeltem Pollen auf den Befruchtungserfolg	96
3.3.1	Keimung trocken begasten Pollens	96
3.3.1.1	Picea abies im Vorversuch	96
3.3.1.2	Picea omorika	99
3.3.2.	Befruchtungserfolg unterschiedlich SO ₂ -begasten Pollens	100
3.3.3	Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse	106
3.4	Freilanderhebungen	108
3.4.1	Vorversuche	109
3.4.1.1	Einfluß von Erntemethode und Witterung auf die Pollenkeimung	109
3.4.1.2	Kleinstandörtliche Unterschiede	111
3.4.1.3	Einfluß des Entnahmeorts in der Krone	112
3.4.1.4	Einfluß des Abblühstadiums	115
3.4.1.5	Varianz der Pollenschlauchlänge und des Keimprozents	116
3.4.1.5.1	Varianz der Pollenschlauchlänge und des Keimprozentes bei Fichte	116
3.4.1.5.1.1	Varianz der Pollenschlauchlängen zwischen den Pollenkörnern	117
3.4.1.5.1.2	Varianz der Pollenschlauchlänge und des Keimprozentes zwischen den Blüten eines Individuums	118
3.4.1.5.1.3	Interindividuelle Varianz	119
3.4.1.5.2	Varianz der Pollenschlauchlänge bei Kiefer	119
3.4.2	Zusammenhang zwischen Waldschäden und generativen Merkmalen	122
3.4.2.1	Pollenkeimung	122
3.4.2.2	Zapfenbehang und Vitalität des Samens	127
4.	Diskussion	131
4.1	Freilanderhebungen	133
4.2	Pollenkeimungsversuche <i>in vitro</i>	138
4.3	Befruchtungserfolg SO ₂ -begasten Pollens	143
5.	Zusammenfassung	146
5.1	Einwirkung ausgewählter Pollutantien auf die Pollenkeimung von Pinaceen	146
5.2	Bestäubung mit SO ₂ -begastem Pollen	148
5.3	Freilanderhebungen	149
6.	Literatur	150

1. Einleitung

Anfang der achtziger Jahre wurde man durch augenfällige morphologische Veränderungen, sowie durch Nadelvergilbungen und Nadelverluste auf eine neuartige Erkrankung von Waldbäumen aufmerksam. Zunächst beschränkten sich die Untersuchungen vorwiegend auf morphologische Symptome (ROLOFF 1984, SCHÖTT 1981, SCHÖTT et al. 1984), sowie auf ertragskundliche (RÖHLE 1985, 1986) und ernährungskundliche (BOSCH 1983) Fragestellungen.

Bis 1987 blieben Auswirkungen auf das generative System unbeachtet, obwohl Beobachtungen von praktizierenden Forstbeamten über Ausbleiben der Verjüngung (GRAF, mündl. Mitt.), die Vermutung nahelegten, daß auch die generative Phase bereits vom Waldsterben-Syndrom in Mitleidenschaft gezogen ist.

Der ungestörte Ablauf generativer Prozesse ist für das Wachstum und den Erhalt einer Population unabdingbar. Schäden an der Fruktifikation von Forstpflanzen durch Luftschadstoffe wurden bereits von PELZ (1963) und ANTIPOV (1970) für Fichte, WENTZEL (1963) für Buche, sowie von PODZOROV (1965) und MRKVA (1969) für Kiefer beschrieben. Ebenso liegen Untersuchungen vor, wonach mutmaßlich am Waldsterben beteiligte Pollutantien Schäden an der Pollenkeimung hervorrufen. (COX (1983), MEJNARTOWICZ & LEWANDOWSKI (1985)). Auch aus dem

agrarwissenschaftlichen Forschungsbereich sind Schäden durch Immissionen an Früchten und Samen bekannt. (REICH 1984, SKARBY 1984, ROBERTS 1984, SIDHU 1986).

Allgemein gilt die reproduktive Phase als störungsanfällig (COX 1987, STANLEY & LINSKENS 1974). Dabei kann die Entwicklung der Pollen oder der Samenanlage schon vor der Anthese beeinträchtigt werden, der Pollen kann während der Transmission geschädigt werden oder die Befruchtung selbst wird aufgrund vielfältiger Ursachen verhindert.

Die vorliegende Arbeit prüft das Pollenkeimungs- und Fruktifikationsverhalten unterschiedlich stark geschädigter Bäume, um etwaige Veränderungen, die mit den morphologischen Schäden einhergehen, festzustellen. Als Versuchsbaumart wurde *Picea abies* gewählt, denn sie war von Anfang an stark von den Auswirkungen des Waldsterbens betroffen, und ihre Blüh- und Fruktifikationsintensität ist stärker als bei den schwererfrüchtigen Baumarten Eiche und Buche.

Die ersten Autoren, die sich mit den Auswirkungen des Waldsterbens auf die Samenproduktion beschäftigten, waren BURSCHEL et al. (1987) und STUTZ et al. (1987). Sie fanden bei Buche und Fichte keine mit dem Vitalitätsverlust des Mutterbaums in Zusammenhang stehenden Unterschiede in der Saatgutmenge und -qualität.

Bei diesen Samenuntersuchungen war der Gesundheitszustand des Pollenspenders unbekannt. Nicht bekannt war außerdem, ob dessen Vitalität die Funktionstüchtigkeit des Pollens und damit die Befruchtung und Viabilität des Samens beeinflusst.

STUTZ et al. (1987) verfolgten in erster Linie wirtschaftliche Gesichtspunkte. Sie kamen zu dem Ergebnis, daß gesunde und kranke Bäume Saatgut in ausreichender Menge produzieren, und die Samen den Qualitätsanforderungen, unabhängig vom Schädigungsgrad des Mutterbaums genügen. Unterschiede im Tausendkorngewicht und in der Keimkraft, die mit der Vitalität des Mutterbaums korreliert werden konnten, fanden sie nicht.

BURSCHEL et al. (1987) überprüften auch morphologische Kriterien der Samen. Auch sie fanden keine auffallenden Abweichungen bei deutlich geschädigten Individuen.

Beide Untersuchungen zeigen, wie groß die individuellen Unterschiede in der Fruktifikationsintensität, im Tausendkorngewicht oder im Keimprozent sein können. Dabei wurde nicht analysiert, welche exogenen Faktoren die Streubreite verursachen.

Generell sind pathologische Veränderungen jedoch nur zu erkennen, wenn die natürliche Variationsbreite und die modifikatorischen Einflüsse in ihrer Bedeutung für das untersuchte Merkmal bekannt sind.

Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit zunächst der Einfluß naturgegebener Faktoren auf die Pollenschlauchlänge bei Fichte und Kiefer ermittelt, um standardisierte Methoden zur Probenentnahme abzuleiten und die genetische und exogen bedingte Varianz zu ermitteln.

Aufbauend auf diesen Erhebungen wird der Einfluß des Waldsterbens auf ausgewählte Merkmale der generativen Phase untersucht.

Ergänzend zu diesen Freilandhebungen fanden Laborversuche statt, die die Auswirkung verschiedener, bei der Ursachenforschung des Waldsterbens diskutierter

Pollutantien auf die Pollenkeimung *in vitro* testeten. Bei der Diskussion über die Ursachen des Waldsterbens sind neben den drei Haupterklärungsansätzen Ozon (ARNDT 1983), Saurer Regen (ULRICH 1983) und der Stresshypothese (SCHÜTT et al. 1984) eine Reihe von Schadstoffen im Gespräch, deren pflanzen-toxische Wirkung bisher wenig Beachtung fand. Teils handelt es sich um Stoffe, die im Experiment bekannte Schadensbilder hervorrufen (MASUCH et al. 1986), teils um Stoffe, deren Konzentrationsverteilungsmuster entweder zeitlich oder räumlich dem Auftreten des Waldsterbens zuzuordnen sind. (FRANK & FRANK 1986, 1987; FAULSTICH & STOURNARAS 1984, 1985; STOURNARAS 1985, SCHULTE-UEBBING 1985).

Keimungstests sollten die Schädlichkeit dieser chemischen und physikalischen Substanzen auf die Pollenkeimung ermitteln, und darüberhinaus die Eignung von Pollen als Bioindikator überprüfen.

Die Schwierigkeiten bei dieser Art von Laborversuchungen bestehen darin, die Reaktion des Pollens auf die Testsubstanz von den Reaktionen auf unterschiedliche, teils mit der Testsubstanz gekoppelten, Keimbedingungen zu trennen.

Ein Teil der Arbeit widmet sich deshalb dem Keimverhalten von Pinaceenpollen in Abhängigkeit von den Testbedingungen.

Von einigen Luftschadstoffen, speziell SO_2 , ist bereits bekannt, daß sie das Pollenschlauchwachstum hemmen (HOUSTON & DOCHINGER 1977, SCHOLZ 1984, BEDA 1982). Nicht bekannt ist, ob diese Reduktion biologisch relevant ist und sich beim Vorgang der Befruchtung auswirkt. Ein abschließender Bestäubungsversuch mit trocken begasten Pollen ist speziell auf diese Frage ausgerichtet.

2. Material und Methoden

2.1 Pollenaufbereitung und Pollenkeimung

2.1.1 Pollenernte und -gewinnung

Ein Großteil der Untersuchungen konzentrierte sich auf die Entwicklung von Nadelholzpollen. Eine Übersicht über Art und Herkunft der verwendeten Pollen vermittelt Tab. 1. Zur genauen Standortsbeschreibung der Probeflächen vgl. Abschn. 2.4.1 und 2.5.1. Zum Vergleich verschiedener Herkünfte stellte die Samenplantage Escherode die Pollen Kie 11 (Stetzfeld), Kie 40 und Kie 46 (beide Ostpreußen), sowie Fi 1 (Mandelbeck), und Fi 4 (Oderhaus) aus der Ernte 1984 zur Verfügung. Bei der Beschreibung der Laborversuche sind die einzelnen Pollenproben unter der angegebenen Kurzbezeichnung geführt.

TABELLE 1 Gewinnungsorte und Erntejahre der verwendeten Pollenproben.

Kurz- Bezeichnung	Baumart	Herkunft	Erntejahr
	Abies- arten	Forstl. Versuchsgarten Grafrath	1986
FFB	Pinus sylvestris	FoA Fürstenfeldbruck	1985/86/87
FFB 00	Picea abies	"	"
S 000	Picea abies	FoA Sauerlach/Höhen-	1985-1988
S	Pinus sylvestris	kirchner Forst	"
	Cedrus atlantica	Bonn	1985
Kie 11	Pinus sylvestris	Samenplantage Escherode	1984
Kie 40	"	"	"
Kie 46	"	"	"
Fi 1	Picea abies	"	"
Fi 4	"	"	"
B 43	Picea abies	FoA Bodenmais 1200mNN	1984

Sofern nicht anders vermerkt, wurden die Zweige mit den noch geschlossenen männlichen Blüten mit der Baumschere aus dem unteren Teil der Krone entnommen, alle Knospen, die sich bereits geöffnet hatten, entfernt (vgl. 2.5.4.4) und die Zweige im Labor bei 20°-22°C und 35-45% Luftfeuchte zur Nachreife in Wasser gestellt. Nach ca. 48 Stunden öffneten sich die Knospen und entließen den Pollen auf das darunter ausgelegte Papier, auf dem er 2-3

Tage nachtrocknete. Der lufttrockene Pollen wurde mit einem Haushaltssieb von groben Verunreinigungen befreit und in Portionen von 2-3 cm³ in Gläschen gefüllt, diese mit steriler Watte verschlossen und gelagert.

2.1.2 Pollenlagerung und -akklimatisierung

In allen Fällen wurde der Pollen in mit steriler Watte verschlossenen Gläschen im Exsikkator über Silikagel aufbewahrt.

Für die Lagerung über längere Zeiträume wurde der Exsikkator mit Inhalt bei -18°C eingefroren. Mittelfristige Aufbewahrung über 2-4 Monate erfolgte bei +4°C im HERAEUS Kühltank. Allerdings zeigte sich, daß der so gelagerte, kühltankkalte Pollen nicht keimte, wenn er direkt aus der Kühlung auf das Keimsubstrat aufgebracht wurde, ebenso wie er auch nicht auf kalten Agarplatten um +6°C keimte, obwohl die Platten während der anschließenden Keimung bei 21°C inkubiert wurden. Daher wurde der Pollen vor den Keimtests mindestens 48h bei Zimmertemperatur akklimatisiert. Pollenmengen für den Bedarf von 2-3 Wochen wurden beizeiten entnommen und bis Versuchsbeginn unter Laborbedingungen (rel. Lf. um 40%, Raumtemperatur 20°-22°C) aufbewahrt.

2.1.3 Pollenkeimung *in vitro*

2.1.3.1. Keimsubstrate

Für die Keimtests wurden zwei Nährmedien, Saccharoseagar und Wasseragar, verwendet. Nach FRÖHLICH (1964) liegt der optimale Saccharoseanteil für die Fichtenpollenkeimung bei 15%. Der verwendete Saccharoseagar enthielt 1,5% Gewichtsteile Agar-Agar und 15% Gewichtsteile Saccharose plus 83,5% Gewichtsteile Aqua demin.; Wasseragar enthielt 2% Agar-Agar plus Aqua demin. ad 100g. Die Substrate

wurden im Autoklaven (DEUTSCH und NEUMANN) bei 135°C 20 Minuten sterilisiert und anschließend im Laminarflow in Einwegpetrischalen (GREINER) mit 55mm Durchmesser gegossen. Die erstarrten Agarplatten wurden in sterile Plastiktüten verpackt und bei Zimmertemperatur aufbewahrt. (vgl. Abschn. 2.1.2 Pollenakklimatisierung)

2.1.3.2 Standardkeimverfahren

Für die Keimversuche wurden die Pollenproben mit einem sterilen Haarpinsel aus den Gläschen entnommen und in der Impfkammer auf die Agarplatten gestäubt. Von jeder Probe wurden 4 Wiederholungen angesetzt. Die mit Parafilm abgedichteten Petrischalen wurden bei 21°C im MEMMERT - Brutschrank 48h (*Picea abies* und alle Abiesarten) bzw. 96h (*Picea omorika*, *Pinus sylvestris* und *Cedrus atlantica*) ohne Licht inkubiert.

2.1.3.3 Meßverfahren

Die Pollenschlauchlänge wurde via Bildschirm an einem halbautomatischem Auswertegerät (Videoplan Fa. KONTRON) ermittelt. Es wurde nur die Pollenschlauchlänge von der Apertur zur Spitze erfaßt, der Durchmesser des Pollenkorns ging nicht in die Messung ein. Dabei wurde der auszuwertende Bereich der Agarplatte mit 0,9%iger NaCl-Lösung beträufelt und mit einem Deckglas abgedeckt. So konnten störende Lichtreflektionen in der Umgebung des Pollens verhindert werden, ohne ein osmotisch bedingtes Platzen der Pollenschläuche zu riskieren. Bei Vorversuchen mit Fichte und Tanne betrugen die Standardabweichungen der mittleren Pollenschlauchlänge zwischen 35 und 46. Um einen repräsentativen Mittelwert der Pollenschlauchlänge zu erhalten, wurden daher 100 Messungen pro Petrischale vorgenommen. (vgl. 2.6).

Zur Ermittlung des Keimprozentes dienten pro Schale 200 Pollenkörner als Stichprobe. Als gekeimt galten Pollen, deren Pollenschlauch bei 100facher (Picea- und Abiesarten) bzw. 250-facher (Pinus und Cedrusarten) Vergrößerung deutlich sichtbar aus der Apertur zwischen den Luftsäcken hervorragte. Im Gegensatz zu anderen Autoren (VARSHNEY & VARSHNEY 1981, BEDA 1984, GAUDLITZ 1983) wurden dabei alle gekeimten Pollen erfaßt, auch jene, deren Pollenschlauchlänge noch nicht den Durchmesser des Pollenkorns erreicht hatte. Dadurch ergaben sich normalverteilte Häufigkeiten der Pollenschlauchlängen statt linksschiefer Verteilungen. Hierbei entspricht der arithmetische Mittelwert dem geometrischen Mittel und ist dadurch aussagekräftiger. Außerdem ist die Anwendung des T-Tests möglich.

2.1.3.4 Herstellung von Dauerpräparaten

Bei besonders umfangreichen Versuchen mußten die Keimrate und die Keimschlauchlänge bei einem bestimmten Entwicklungszustand bis zur Auswertung fixiert werden, da eine gleichzeitige Aufarbeitung nicht möglich war. Dies war durch 24-stündiges Trocknen der Agarplatten bei niedrigster Stufe im handelsüblichen Dörrapparat SIGG Dörrex zu erreichen. Auf diese Weise entstanden klar durchsichtige, papierdünne Dauerpräparate. Die Saccharosenährboden wurden anschließend eingefroren um den Kristallisationsprozess zu verlangsamen. Bereits kristallisierte Proben wurden direkt vor der Auswertung (ca 1h) bis zur Auflösung der Kristalle befeuchtet.

2.2 Einfluß allgemeiner Umweltbedingungen auf das Pollenschlauchwachstum *in vitro*

2.2.1 Luftfeuchte

2.2.1.1 Bei unbewegter Luft

Um den Einfluß der relativen Luftfeuchte auf das Pollenschlauchwachstum zu ermitteln, wurden Keimversuche mit Pollen Fi 4 auf Wasseragarplatten in luftdicht mit Parafilm verschlossenen, sterilen Glasgefäßen über NaCl-Lösungen unterschiedlicher Konzentration angesetzt. Die Konzentration der Lösung bestimmt deren Dampfdruck und damit die relative Luftfeuchte der darüber ruhenden Luft. Aus Tab. 2 ist ersichtlich, welche Salzkonzentrationen verwendet wurden und wie diese die Luftfeuchte beeinflussen (PAECH 1952).

TABELLE 2 Relative Luftfeuchte über NaCl-Lösungen verschiedener Konzentrationen

Konzentration in Mol NaCl/l	rel. Luftfeuchte in % bei 20°C
0,6	98,1
2,0	93
3,0	88
4,0	83
gesättigt	75,8

2.2.1.2 Bei strömender Luft

Für Begasungsversuche ist ein stetiger Luftstrom erforderlich. Bei den hier durchgeführten Versuchen erreichte die über einen Kohlefilter angesaugte Raumluft einen Massendurchfluß, der einen gleichmäßigen Durchsatz von 2 l/Min garantierte. Anschließend strömte sie durch eine Waschflasche in der sie sich mit Wasserdampf sättigte. Im nachfolgenden Wasserabscheider fiel je nach Taupunkt ein Teil des Wassers wieder aus. Der Taupunkt ist der Temperaturpunkt, an dem durch weitere Abkühlung Wasserdampf aus der Luft kondensiert, da die absolute Wasserdampfmenge die Wasserdampfsättigung überschreitet. So enthält 1m³ wasserdampfgesättigte Luft bei 24°C 21,75g Wasser, bei 20°C 17,27g. Durch anschließende Wiedererwärmung ändert sich die relative Luftfeuchtigkeit entsprechend dem absolutem Wasserverlust. Im obigen Beispiel bewirkt die Abkühlung von 24°C auf 20°C nach der Wiedererwärmung auf 24°C eine (errechnete theoretische) relative Luftfeuchte von

$$\frac{17,27 \text{ g} \times 100 \%}{21,75 \text{ g}} = 79,4\%$$

Je nach Raumtemperatur und Temperatur im Wasserabscheider läßt sich auf diese Weise die gewünschte Luftfeuchtigkeit steuern.

Die Raumtemperatur wurde mit einem Lamprechtschreiber dokumentiert, die Temperaturschwankungen im Versuchsbehälter mit einem Minimum - Maximum Thermometer täglich abgelesen. Mehrmals täglich wurde die tatsächlich Luftfeuchtigkeit im Versuchsbehälter mit einem Testo 6400 Sekundenhygrometer (Fa. TESTOTHERM) überprüft.

2.2.2 Temperatur

Der Einfluß der Temperatur im Bereich zwischen 17°C und 28°C auf das Pollenschlauchwachstum wurde mit dem Standardkeimverfahren (vgl. Abschn. 2.1.3.2) parallel in mehreren MEMMERT Brutschränken geprüft.

2.2.3 Licht

Je Versuchseinheit keimten vier Wiederholungen mit Fi 4 Pollen unter einem TRUE-LITE Tageslichthimmel in unterschiedlichem Abstand zur Strahlungsquelle und unter natürlichem Lichteinfluß am Nordfenster des Labors. Die Lichtmenge wurde mit einem Quantum Photometer (Modell LI-185B, Fa. Li-COR) gemessen. Je nach Abstand zur Strahlungsquelle betrug sie 20, 50 und 300 Microeinstein/m²/sec. Bei natürlichem Tageslicht schwankte die Lichtquantität zwischen 20-300Microeinstein/m²/s. Die Kontrolle befand sich jeweils unmittelbar neben der lichtexponierten Probe und war durch eine aus schwarzem Fotokarton gefaltete Abdeckung von der Lichtquelle abgeschirmt. (vgl. Abschn. 2.3.2).

2.2.4. pH-Wert

Wasseragarplatten ohne chemische Zusätze haben einen pH-Wert von 5,9; Saccharoseagarplatten einen pH-Wert von 6,3. Zur Ermittlung des pH-Optimums der Pollenkeimung wurde dem noch flüssigen, ca. 60°C heißen, Substrat H₂SO₄ zugegeben bis der angestrebte pH-Wert von 2,5; 3,5; 4,5 oder 5,1 erreicht war. Der pH-Wert wurde mit einem Schott Potentiometer GG 822 ermittelt.

Pufferlösungen

Um unerwünschte Erniedrigungen des pH-Werts im Keimsubstrat infolge SO_2 -Absorption zu vermeiden, wurden bei Vorversuchen zur SO_2 -Begasung die gebrauchsfertigen Pufferlösungen Citrat-Natronlauge pH 5,00 und Citrat-Salzsäure pH 4,00 (MERCK) zugesetzt.

Die verwendeten Konzentrationen veränderten den pH-Wert wie in Tab. 3 gezeigt. Zum Vergleich wurden auch Platten mit dem gleichen pH-Wert durch H_2SO_4 -Zugabe hergestellt.

TABELLE 3 In ihrer Wirkung auf die Pollenkeimung getestete Pufferlösungen (Konzentration in Vol% und pH-Wert des Nährmediums).

Citrat-Natron- lauge in Vol%	Citrat-Salz- säure in Vol%	pH-Wert
1%		5,4
2%		5,3
5%		5,2
	0,5%	5,1
	1,0%	4,8

2.2.5 Kontamination durch Mikroorganismen

Bakterielle Verunreinigungen und Besiedlung mit *Taphrina spec.* traten nur selten auf, entsprechend kontaminierte Schalen wurden verworfen.

Eine Besiedlung mit *Penicillium spec.* und weiteren nicht näher bestimmten Pilzarten war unter den gegebenen Bedingungen nicht vermeidbar. Verunreinigungen in verschlossenen, unter sterilen Bedingungen in der Impfkammer bestäubten Schalen sind auf an der Pollenoberfläche anhaftende Pilzsporen zurückzuführen. In diesen Fällen wurde angenommen, daß die Kontaminationen und deren Einfluß auf die Pollenkeimung bei der Kontrollprobe und der exponierten Probe gleich waren.

Bei Begasungsexperimenten wurden mit dem Luftstrom zwangsläufig zusätzliche Sporen auf das Nährmedium gebracht. Auf diese Weise verunreinigte Proben wurden ebenfalls verworfen, sofern ein Einfluß der Mikroorganismen auf die Pollenkeimung offensichtlich war.

Fungizide

Zur Eindämmung der Kontamination durch Pilze wurde den Substraten vor dem Erstarren 50mg/l Orthophenylphenol (OPP) bzw. 10mg/l CLOTRIMAZOL (Canesten, Fa. BAYER) zugesetzt. Die Substanzen wurden zuvor in Ethanol (96%) gelöst (200mg/100ml) (ZHANG & HOLDENRIEDER 1983).

Nach ZHANG & HOLDENRIEDER (1983) sind 50mg/l Orthophenylphenol (OPP), oder 10mg/l CLOTRIMAZOL ausreichend wirksam um *Penicillium*-Kontaminationen auf Nährmedien zu unterbinden. Unterhalb 50mg/l bzw. 10mg/l war dies nicht mehr der Fall (ibidem).

Auf Pollen angewandt, führte der Zusatz von CLOTRIMAZOL (Canesten) oder OPP zum Nährmedium in der erforderlichen Konzentration zum Kollabieren der vegetativen Zelle des Pollenkorns.

Bei den Begasungsversuchen mußte daher auf Zusätze von Fungiziden zur Eindämmung der *Penicillium*-Kontamination verzichtet werden.

2.3 Wirkung verschiedener Pollutantien auf die *in vitro* Pollenkeimung

2.3.1 Im Wasser gelöste Pollutantien

Bei der Ursachenforschung zum Waldsterben werden auch Schadstoffe diskutiert, die die Pflanzen im Niederschlagswasser oder im Nebel gelöst erreichen. Besonders interessant erscheinen H_2O_2 , das in Konzentrationen von 1-5ppm in Nebel gelöst, Nadelschädigungen bei Fichte auslöst, die den Symptomen der Waldschäden ähneln (MASUCH et al. 1986) und Chlorkohlenwasserstoffe, deren Konzentrationsverteilungsmuster sich mit der Intensität des Waldsterbens deckt (FRANK und FRANK 1984). Auch von Triethylblei wird mitgeteilt, daß es Schädigungen an Waldbäumen hervorruft (FAULSTICH & STOURNARAS 1984).

Diese Stoffe sind zwar teilweise ihrer chemischen Natur nach nicht wasserlöslich, können jedoch in geringen Konzentrationen in Wasser gelöst werden. So beträgt die Löslichkeit von Trichlorethen bei 20°C 0,1g/100ml H_2O (KIMBROUGH 1985 et al.). In Konzentrationen von 100ppm lösen sich wasserunlösliche Substanzen, schwer wasserlösliche Stoffe im Bereich zwischen 100-1000ppm (RÖMPP 1985).

Mit folgenden Methoden sollte die Wirkung dieser Substanzen auf die Pollenkeimung getestet werden:

1. Pollenkeimung in Aqua demin. unter Zusatz der Testsubstanz in der angegebenen Konzentration.
2. Beimischung der Testsubstanz zum Nährmedium.
3. Auftropfen der verdünnten Testsubstanz auf die Agarplatte.

Im ersten Versuchsschritt wurden die folgenden Lösungen von Testsubstanzen in Aqua demin. verwendet:

- 100ppm Trichlorethen,
- 100ppm Tetrachlorethen
- 100ppm Tetrachlorkohlenstoff
- 5 und 10 ppm H_2O_2 .

Die Pollen keimten direkt in oder auf der jeweiligen Lösung in Vertiefungen von Hohlschliffobjektträgern. Die Objektträger lagen in mit feuchtem Zellstoff ausgekleideten Petrischalen von 150mm Durchmesser, entsprechend dem bei FRÖHLICH 1965 beschriebenen Prinzip der feuchten Kammer. Als Kontrollmedium diente steriles, deionisiertes Wasser.

Durch steigende Verdünnung mit Aqua demin. ließ sich eine Konzentrationsreihe mit Triethylblei mit folgenden Konzentrationen herstellen:

0,1 μMol ,
0,5 μMol ,
1,0 μMol ,
5,0 μMol und
10,0 μMol pro Liter.

Die toxische Wirkung dieser Lösungen auf die Pollenkeimung wurde in feuchten Kammern getestet.

Bei diesem Verfahren war die Auswertung durch die Beweglichkeit der Pollen einerseits und durch ihr geklumpstes Auftreten auf dem höchsten Punkt der konkav gewölbten Wasseroberfläche andererseits, erschwert. Deshalb konnte nur das Keimprozent zuverlässig ermittelt werden. Zudem entstand der Verdacht, daß Pollen, die im Randbereich des Wassertropfens keimten, Feuchtigkeitsschwankungen ausgesetzt waren, die die Pollenschlauchlänge beeinflussten. Die Wirkung der Testsubstanzen auf die Pollenschlauchlänge wurde daher auf Agar-Platten geprüft. Dabei wurden die Testsubstanzen der flüssigen, 50°C warmen Agarlösung zugegeben. Die verwendeten Substanzen und deren Konzentrationen sind Tab. 4 zu entnehmen.

TABELLE 4 Substanzen (mit Konzentrationen), deren Wirkung auf die Pollenschlauchlänge getestet wurde.

Substanz	Konzentration
Tetrachlorethen	200ppm
	500ppm
	800ppm
Trichlorethen	500ppm
	800ppm
Tetrachlorkohlenstoff	200ppm
	500ppm
H ₂ O ₂	110ppm
	50ppm

Wegen der hohen Toxizität wurde für Triethylblei dieser Versuch zur Ermittlung der Pollenschlauchlänge nicht durchgeführt. Für diese Substanz liegen daher nur Keimprozent in Abhängigkeit von der Konzentration vor.

Außerdem wurde die wasserlösliche Fraktion von Autoabgasen (vgl. Abschn. 2.3.3.4), im folgenden als Kondensat bezeichnet, auf Konzentrationen von 1%, 5%, 10% verdünnt. 50µml der Verdünnung wurde mit einer Eppendorf-Pipette auf die Agaroberfläche aufgetropft. Auf der so präparierten Nährplatte wurde die Keimfähigkeit von Fichtenpollen getestet. Für die Dauer der Keimung wurden die Proben, wie unter Abschnitt 2.1.3.2 beschrieben, inkubiert.

2.3.2 Elektromagnetische Wellen und Felder

Der Einfluß elektromagnetischer Wellen verschiedener Wellenlänge auf die Pollenkeimung von Fichte und Kiefer wurde untersucht. Dabei erfolgte die Bestrahlung durch den mit Parafilm verschlossenen Deckel der Petrischale. Veränderungen der Umgebungsluftfeuchtigkeit und Fremdkontaminationen waren dadurch ausgeschlossen. Eine Übersicht über die verwendeten Wellenlängen vermittelt Tab. 5.

TABELLE 5 In ihrer Wirkung auf die Pollenkeimung getesteten Wellenarten und deren Längen

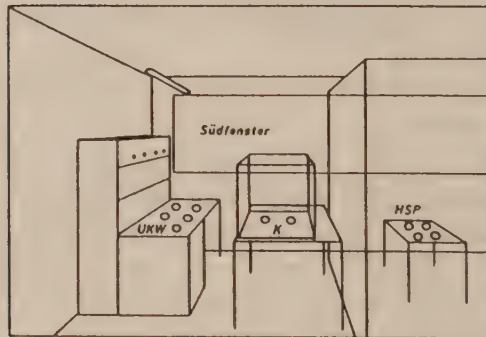
BEZEICHNUNG	WELLENLÄNGE
UKW	3 m
RADAR	2,3 cm
Spektralbereich d. sichtbaren Lichts (TRUE LITE)	390-770 nm
UV	200-400 nm
Röntgen	1- 10 nm

Die Bestrahlung mit UKW und Radar fand an der WE Elektronik und Radar der Universität der Bundeswehr, München mit eigens für diese Versuchskonzeption gebauten Sendern statt. (FREIBOTH 1986, LUNGERSHAUSEN 1987, GRIESHAMMER 1987). Dieses Institut stellte außerdem ein elektrisches Hochspannungsfeld bereit. Als UKW-Sender diente eine Dipolantenne mit einer Frequenz von 98,5 MHz ($\lambda=3\text{m}$), die Feldstärke betrug zwischen 0,2V/m, 0,4V/m und 0,6V/m. Diese UKW-Belastung ist mit der Emmission eines herkömmlichen Senders vergleichbar.

Die Bedingungen im elektrischen Feld mit einer Leistung von 50 Hz und einer Feldstärke zwischen 2kV/m und 10kV/m, je nach Abstand zur Anode, entsprechen zum Teil denen unter einer Hochspannungsleitung, die nach WAYLAND et al. (1975) und DIPROSE & BENSON (1984) bis zu 5kV/m beträgt.

Von STAPEL (1987) wurden nur Werte unter 2KV/m gemessen. Proben unter dem UKW-Sender und im elektrischen Feld wurden nicht inkubiert, sondern waren während ihrer gesamten Keimdauer, 48h für Fichte und 96h für Kiefer, der Bestrahlung ausgesetzt, die Kontrolle wurde mit einem Faraday'schen Käfig abgeschirmt. Die allgemeinen ökologischen Keimbedingungen wie Temperatur und Licht entsprachen dadurch nicht dem Standardkeimverfahren (vgl. Abschn. 2.1.3.2). Die Anordnung der Geräte ist in Abb. 1 dargestellt.

Abb. 1 Versuchsanordnung zur Prüfung des Einflusses von UKW und elektrischen Feldern



UKW: Ultrakurzwellenbereich
 K: Faraday'scher Käfig
 HSP: Hochspannungsfeld

Der Radarbeschuß war auf 1, 5 und 10 Minuten beschränkt. Als Strahlenquelle diente ein Magnetron Radarsender, der Pulse von $0,4\mu\text{s}$ Pulslänge mit einer Frequenz von 8-9GHz und einer Pulsfolge von 1280Hz abstrahlte. Die erwünschte Leistungsdichte wurde durch Veränderung des Abstands r zwischen Versuchsobjekt und Strahlenquelle erreicht. Der Abstand r richtete sich entsprechend der erwünschten Leistungsdichte S_r nach der Gleichung

$$S_r = 2r^{-2} \cdot P_s$$

Wobei S_r die Leistungsdichte und P_s die Sendeleistung darstellt. Die Sendeleistung wurde mit einem Leistungsmesser hp 436 A ermittelt und betrug im Mittel 1,85 Watt. Daraus ergaben sich folgende Leistungsdichten: $2,7\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$, $6,0\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$, $9,0\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ und $12,0\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$.

Die Proben befanden sich während der Bestrahlung in einer mit adsorptionsfähigem Material ausgekleideten Kabine.

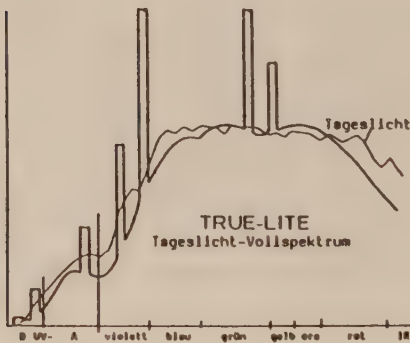
Für die Röntgenbestrahlung diente ein Materialprüfgerät (FAXITRON N 43804) der FVA München. Die Kathodenspannung dieses Geräts beträgt konstant 3mA, d.h. die Dosisleistung war in allen Versuchen gleich. Verändert wurde die Expositionszeit und die Anodenspannung. Die Expositionszeit betrug 1, 5, 10 oder 55 Minuten, die Anodenspannung betrug 30kV, 50kV oder 110kV. Mit steigender Anodenspannung verkürzt sich die Wellenlänge linear, allerdings ist die Angabe der Wellenlänge nicht möglich, da das zugeführte Röntgenlicht nicht monoenergetisch ist, sondern das Spektrum zwischen 1-10nm umfaßt (Mündliche Mitteilung der Herstellerfirma ROHDE und SCHWARZ).

Mit einem TRUE-LITE Lichthimmel (Fa DUROTEST, USA) wurden die keimenden Pollen in unterschiedlichen Lichtstärken beleuchtet. Das Spektrum des Lichthimmels im Vergleich zum Tageslicht ist in Abb. 2 dargestellt. Die Kontrolle war neben den beleuchteten Proben exponiert und mit

schwarzem Fotokarton abgedeckt. Gleichzeitig keimten Pollenproben unter natürlichen, stark schwankenden Tageslichtbedingungen am Fenster im selben Raum. Je nach Witterung und Sonnenstand wechselte die Lichtintensität am Fenster zwischen 20 - 300 Microeinstein m^{-2}/sec . Die Proben unter dem Lichthimmel wurden gleichzeitig, je nach Abstand von der Strahlungsquelle, mit 20, 50 und 300 Microeinstein/ m^2/sec bestrahlt. Das verwendete Quantum Photometer (Modell LI-185B der Fa LI-COR) mißt nur die Lichtintensitäten im für die Photosynthese relevanten Bereich. Die Umrechnung in Watt ($1 \text{ Microeinstein}/m^2/sec = 0,1 \text{ Watt}/m^2$) ist daher nur angenähert.

Für UV-Tests wurden die Proben in einer Entfernung von 10cm und 20cm vor eine Osram UV-Lampe mit 200 Watt ausgelegt.

Abb. 2 Vergleich des Tageslichtspektrums mit dem Spektrum des TRUE-Lite Lichthimmels



2.3.3 Luftschadstoffe

2.3.3.1 Vorversuch mit SO₂ und O₃, einzeln und in Kombination

1986 wurde in der GSF Neuherberg ein Vorversuch über die Wirkung von O₃, SO₂, sowie O₃ + SO₂ auf die Pollenkeimung durchgeführt. Einem dort laufenden Begasungsexperiment (SCHOTT et al. 1987) wurden Petrischalen mit auf Saccharoseagar keimenden Fichtenpollen (B43) gestellt. Pro Versuch standen vier Kammern zur Verfügung: eine Kontrollkammer, eine mit SO₂, eine mit Ozon und eine vierte mit beiden Schadgasen. Die Konzentration der Schadstoffe erhöhte sich wöchentlich um 50µg von ursprünglich 50µg (18ppb) SO₂ bis auf 250µg (90ppb) SO₂ und von 50µg (25ppb) O₃ auf letztlich 400µg (200ppb) O₃. (Beschreibung der Versuchsanlage bei PAYER et al. 1987). Umfangreichere Hauptversuche wurden an anderen, unter Abschn. 2.3.3.2 für SO₂ und unter 2.3.3.3 für O₃ und NO₂ beschriebenen Geräten durchgeführt.

2.3.3.2 SO₂-Begasung

Aufbauend auf den oben beschriebenen Vorversuchen wurden 1987 umfangreichere Begasungsversuche am Lehrstuhl für Forstbotanik durchgeführt. Bei der hier verwendeten Apparatur wurden für die SO₂-Begasung und die dazugehörige Kontrolle zwei getrennte Luftströme verwendet. Wie das Schaubild (Abb. 3) zeigt, wurde der Luftstrom für die SO₂-Begasung über einen Kohlefilter (Fc.) gepumpt und mit einem Vordruck von 0,7 bar durch einen elektronischen Massendurchflußregler geleitet (MD₁) (Fa. TYLAN FC 260 Mass flow controller), der eine Strömungsgeschwindigkeit von 2l/Min einregelte. Danach erreicht die Luft eine Waschflasche (H₂O), in der sie sich mit Wasserdampf nahezu sättigt. Im nachfolgenden Wasserdampfabscheider kondensiert, je nach Höhe des Taupunktes (vgl. Abschn. 2.2.1), ein Teil des Wasserdampfes. Die so präparierte Luft mischt sich im Mischgefäß (MG) mit dem SO₂-haltigen Luftstrom, der einer Gasflasche mit 100 ppm SO₂ (Fa Matheson, mit Zertifikat für 100ppm +/- 10%) entstammt. Das zugeführte Gas wird über einen zweiten Massendurchflußregler (MD₁₁) zudosiert. Die endgültige SO₂ Konzentration berechnet sich nach der Gleichung

$$\text{SO}_2 \text{ (ppb)} = \frac{x \text{ ml/Min} \cdot 100 \text{ ppm}}{2 \text{ l/Min}}$$

Wobei x den frei wählbaren Durchfluß in ml/Min des Massendurchflußreglers MD₁₁ bezeichnet. Es wurden SO₂-Konzentrationen von 100ppb (x=2ml/Min), 150 ppb (x=3ml/Min), 200 ppb (x=4ml/Min) und 250ppb (x=5 ml/Min) verwendet. Diese Konzentrationen wurden durch einen Exsikkator geleitet, in dem die Proben über 3molarer NaCl-Lösung exponiert waren, und anschließend in einer KOH-Lösung aufgefangen.

Für die Kontrollbegasung wird ungereinigte Luft mithilfe

einer Pumpe und einem Reduzierventil mit der gleichen Strömungsgeschwindigkeit von 2l/Min durch eine Waschflasche zur Befeuchtung geführt. Die Durchflußmenge wird über einen mechanischen Rotameter kontrolliert, bevor sie den Kontrollexsikkator mit der 3molaren NaCl-Lösung (vgl.. Abschn. 2.2.1.1) passiert. Die regelmäßig mit dem Testotherm überprüfte Luftfeuchtigkeit bewegte sich im Kontrollexsikkator zwischen 88%-92% im SO₂-Exsikkator zwischen 82% und 88%. Die mit einem Min/Max-Thermometer registrierte Temperatur schwankte während der Versuchsdauer zwischen 22°-24°C. Die Lichtquantifizierung mit dem QUANTUM Photometer (Fa. Li-cor, Inc. Modell LI-185B) ergab 1-2 Microeinstein/m²/sec. Durch die Verwendung von getrennten Luftströmen für die Kontrolle und Begasung ergaben sich geringe Unterschiede im Luftfeuchtegehalt, die allerdings nach den Ergebnissen der Vorversuche die Pollenschlauchlänge nicht verändern.

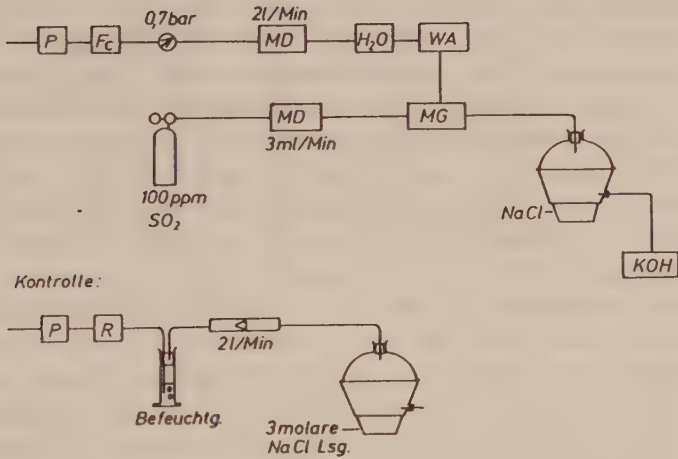
An dieser Apparatur wurden Pollen wie folgt begast:

1. Begasung während der Keimung (48h)

Objekt: Fichtenpollen

- 1.1 Pollen Fi 4 mit Konzentrationen zwischen 100ppb und 250ppb SO₂, zur Ermittlung jener Dosen bei denen eine Förderung oder eine Hemmung des Pollenschlauchwachstums eintritt.
- 1.2 Pollen Fi 4 auf Wasseragar und Saccharoseagar mit 150ppb SO₂, um Auswirkungen des Nährmediums zu testen.
- 1.3 Pollen der Herkünfte Fi 4 Oderhaus und Fi 1 Mandelbeck bei 150ppb SO₂ zur Ermittlung herkunftsspezifischer Reaktionen.
- 1.4 Pollen von Bäumen unterschiedlicher Waldsterbensschadklassen der Versuchsfläche Sauerlach (Erntejahr 1987).

2. Trockener Fichtenpollen (Fi 4) für 3, 4, 5 oder 7 Tage mit $600\mu\text{g}/\text{m}^3$ oder $800\mu\text{g}/\text{m}^3$ SO_2 . Damit sollte die Widerstandsfähigkeit des trockenen Pollens im Vergleich zum keimenden Pollen festgestellt werden. Außerdem sollte dadurch getestet werden, welche SO_2 -Dosis bei trocken begasten Pollen eine 10%ige Verkürzung der PSL im anschließenden Keimungstest bewirkt.
3. Kiefernpollen unterschiedlicher Herkunft und verschiedener Individuen (Kie 46 und 40 Ostpreußen und Kie 11 Stetzfeld) während der Keimung für einen Zeitraum von 96h mit 100ppb SO_2 , zur Ermittlung der individuellen und herkunftsbedingten Reaktion.
4. Pollen von *Abies concolor*, *Abies pinsapo* und dem Art-hybrid *Abies concolor* x *grandis* aus Grafrath mit 100 und 125ppb SO_2 , zur Prüfung artspezifischer Unterschiede in der SO_2 -Sensibilität.
5. Pollen von *Cedrus atlantica* bei Dosen zwischen 100-200ppb zur Ermittlung der SO_2 -Sensibilität im Vergleich zu den Gattungen *Abies*, *Pinus* und *Picea*.

Abb. 3 Schaltbild der SO_2 -Begasungsanlage

Zeichenerklärung:

P Pumpe
 F_c Kohlefilter
 MD Massendurchfluß
 WA Wasserabscheider

MG Mischgefäß
 Rotameter
 NaCl 3 molare NaCl Lösung

2.3.3.3 O₃ und NO₂-Begasung

Begasungsversuche mit O₃ und NO₂ wurden im April und Mai 1987 bei der GSF/Neuherberg in einem Schadgas-Klimaprüfschrank (HERAEUS Vötsch; Typ VSK 04/500/U/S) durchgeführt. Dieses Modell ist für den Luftfeuchtebereich von 30% - 85% mit einer Abweichung von 3-5% konzipiert. Bei einem Luftdurchsatz von 6-10m³/h trockneten die Agarplatten unerwünscht schnell aus, so daß die höchstmögliche, theoretische Luftfeuchtestufe von 100% eingestellt wurde. Die tatsächliche rel. Lf, mit einem kombinierten Lamprechtschreiber in der Begasungskammer aufgezeichnet, betrug zwischen 91-99%, die Temperatur 20°C.

Die unbeleuchtete, 460 mm x 535 mm x 560 mm kleine, Expositions-kammer war mit gelöchertem Edelstahl (Werkstoff 14571) umgeben, der eine allseitige Zuluft ermöglichte. Bei diesem Versuchsaufbau konnte im Gegensatz zu den Vorjahresversuchen, die Kontrolle nicht parallel exponiert werden (vgl. Abschn. 2.3.3.1). Die Schadstoff- und die Reinluftbehandlung mußten nacheinander, wie in Tab. 6 dargestellt, in mehrtägigen Abständen durchgeführt werden. Nach POPNIKOLA (1971) und MARCET (1951) sind durch derartige chronologische Abfolgen Veränderungen im Keimverhalten infolge endogener Rhythmen und Alterungsprozesse zu erwarten. Deswegen wurde zu den Proben in die Expositions-kammer ein luftdicht verschlossener Exsikkator mit einer 3molaren NaCl Lösung beige-stellt, der Parallelproben enthielt. Diese Proben dienten zur Relativierung der zeitlich voneinander getrennten Behandlungen. Tab. 6 zeigt, mit welchen Konzentrationen begast wurde.

TABELLE 6 Zeitliche Abfolge der Reinluft-, O₃- und NO₂-Begasungen unterschiedlicher Konzentrationen

Datum von/bis	Bega- sung	Dosierung
13.4-16.4	O ₃	50 - 80 ppb
16.4-19.4	O ₃	25 ppb
21.4-24.4	O ₃	50 - 75 ppb
24.4-27.4	Reinluft	
27.4-30.4	O ₃	50 - 75 ppb
30.4- 3.5	O ₃	50 ppb
3.5 - 6.5	O ₃	60 ppb
6.5 - 9.5	Reinluft	
19.5-22.5	NO ₂	100 ppb
22.5-25.5	NO ₂	200 ppb
25.5-28.5	NO ₂	125 - 175 ppb
28.5-31.5	NO ₂	250 ppb
31.5- 3.6	Reinluft	(10 ppb NO ₂ ; 7 ppb NO)
3.6 - 6.6	NO ₂	150 - 200 ppb

Begast wurde Pollen von vier Koniferenarten: *Pinus sylvestris* (Kie 46), *Picea abies* (Fi 4), *Cedrus atlantica* und *Abies concolor*. Die Pollen wurden unmittelbar vor der Begasung auf die Wasseragarplatten aufgebracht und während 72h Keimdauer exponiert.

2.3.3.4 Autoabgase

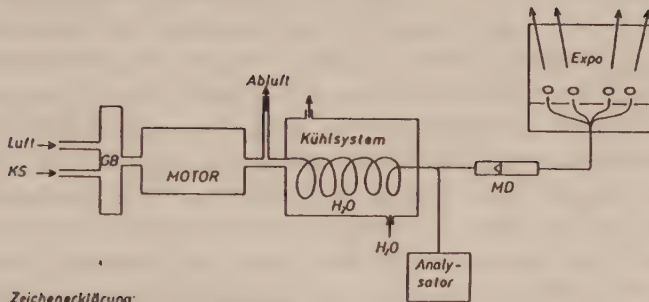
Zur Erzeugung der Autoabgase diente die Sonderanfertigung eines Ottomotors der Fa. Audi. Die Kennwerte des 5-zylindrigen Motors sind in Tab. 7 aufgelistet.

TABELLE 7 Kennwerte des verwendeten Ottomotors.

Zylinderzahl	5
Hubraum	2,1 l
Nennleistung	125 KW
bei Motordrehzahl	5300
max. Drehmoment	265
bei Motordrehzahl	3300
spez. Leistung	58,3 KW/l
Hub/Bohrung	79,5/86,4 mm
Kraftstoff	Super, bleifrei
max. Ladedruck	0,82 bar

Die Einstellung und Belastung des Motors während der Begasungsversuche entsprach mit einer Drehzahl von 2500 U/Min und einem Drehmoment von 120 N (Zündwinkel 5-15°, Systemdruck 2,3-3 bar) etwa denen einer Autobahnfahrt auf ebener Strecke mit 120km/h im 5. Gang. Die Abgase wurden teilweise ins Abluftsystem geleitet, der Rest zur Abkühlung auf 15°- 20°C durch eine 20m lange, in einem Wasserbad liegende Kupferspirale geführt. Ein Thermoelement kontrollierte den Kühlvorgang. Das dabei kondensierende Wasser wurde für spätere Keimversuche aufgefangen. (vgl. Abschn. 2.3.1). Der NOx-Gehalt der Abgasluft wurde mit einem Chemilumineszenzdetektor (CLA-300E, Fa. HORIBA) bestimmt. Mit einem Massendurchflußmesser (Fa. TYLAN) konnte die Durchflußmenge gesteuert werden, die die Expositionskammern erreichte. Die Abgase wurden durch eine gelöcherte Prallplatte verwirbelt und verließen die Kammer durch vier Abzugslöcher des Deckels ins Freie. (Abb. 4). Die Küvetten von 1,2 x 0,8 x 1,0m aus milchglastrübem Kunststoff wurden von KAMMERBAUER (1987) entwickelt und gebaut. Die Proben wurden erst nach 10-minütiger Motorlaufzeit exponiert.

Abb. 4 Blockdiagramm vom Versuchsaufbau der Begasung mit Autoabgasen .



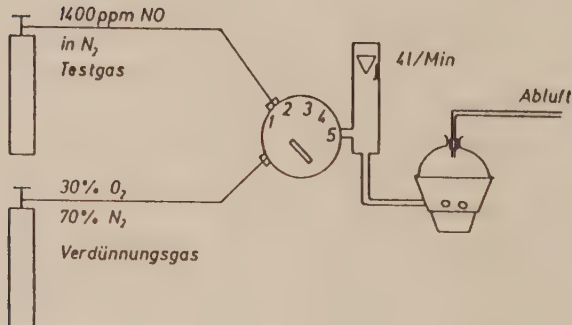
Zeichenerklärung:

GB	Gemischbildner
MOTOR	Ottomotor, 5zylindrig
MD	Massendurchflußregler
KS	Kraftstoff: Superbenzin, bleifrei
Expo	Expositions-kammer (im Freien)

2.3.3.5 Hochdosierte NO_x-Begasung

Für kurzfristige, hochdosierte NO_x-Begasungen stellte der Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeuge der TU München einen Gasmischer Typ SGD-SC zur Verfügung. Dieses Gasmischgerät verdünnt Testgase mit synthetischer Luft oder einem anderem Verdünnungsgas in einem frei wählbaren Verhältnis (zwischen 0:5 und 5:5). Als Testgas wurde 1400ppm NO in N₂ verwendet, zur Verdünnung ein Gasgemisch aus 70% N₂ und 30% O₂. Verdünnt wurde im Verhältnis 0:5, 1:5, 2:5 und 2,25:5. Daraus resultierten NO_x-Konzentrationen von 290ppm, 580ppm, 650ppm und eine Variante ohne NO_x. Die Begasung dauerte 1, 5, 10, bzw. 25 Minuten. Abb. 5 erläutert den Weg der Gase von den Gasflaschen über den Mischer durch den Durchflußmesser (4l/Min) bis zur Expositionskammer.

Abb. 5 Versuchsanordnung für die kurzzeitige hochdosierte NO_x- Begasung



Mit den Abgasen des Ottomotors bzw. einer entsprechend hohen NO_x Dosis wurden außer Fichtenpollen noch Samen von *Picea abies* und Sporen von *Polytrichum attenuatum* begast.

Von *Polytrichum* wurden die Sporen eines Sporangiums auf vier Petrischalen verteilt, jeweils zwei Petrischalen für die Begasung und für die Kontrollbehandlung. Damit wurden individuelle Unterschiede bei der Keimung ausgeschaltet. Die Sporen wurden auf Cellophan in eine Petrischale übertragen. Dort lag das Cellophan auf mit Aqua demin. getränkter, steriler Cellulose. Am zweiten Tag der Keimung wurden die Moossporen den Schadgasen ausgesetzt. Nach zehn Tagen wurde die Protonemalänge analog der Pollenschlauchlänge (Abschn. 2.1.3.3) gemessen. Dazu wurde das Cellophan mit den gekeimten Sporen unter das Durchlichtmikroskop gelegt und das Blickfeld auf den Bildschirm des Videoplans übertragen.

Die Fichtensamen stammten aus einer gut keimenden Probe der Saatgutprüfungsstelle der FVA München. Die Keimung fand in mit steriler Cellulose ausgelegten Petrischalen statt. Die Cellulose war zu ca 80% ihres Wasserhaltevermögens mit Aqua demin. getränkt. Am zweiten Tag der Keimung wurden die Samen mit den anderen Proben für 25 Minuten den Autoabgasen ausgesetzt. Als gekeimt galten Samen, die sieben Tage nach Keimungsbeginn ihre Radicula erkennen ließen. Die Länge der Radicula wurde ermittelt, indem der Wurzelverlauf unter einer Glasplatte in eine zweidimensionale Linie gepresst wurde und diese mit Filzstift auf Overhead-Folien übertragen wurde.

Diese mehrfach gekrümmten Linien konnten über das Meßprogramm des Videoplans durch Abfahren mit dem Magnetstift auf 1/10mm genau gemessen und ihre Länge zur statistischen Auswertung eingespeichert werden.

2.4 Bestäubungsversuch

Ein Bestäubungsversuch sollte klären, ob Pollen, der nach Schadstoffeinwirkung zu kürzeren Schläuchen auskeimt zu verändertem Samenansatz oder zu verringerter Samenvitalität führt. Da eine kontrollierte Begasung während der Pollenkeimung *in vivo* nicht durchführbar war, mußte der Pollen im trockenen, also widerstandsfähigen Zustand vorgeschädigt werden.

VARSHNEY & VARSHNEY (1981) sowie BENOIT (1985), die die Widerstandsfähigkeit von trockenen Pollen im Vergleich zu keimenden Pollen untersuchten, stellten einheitlich fest, daß trockener Pollen eine wesentlich höhere (um den Faktor 100 höhere) SO_2 -Dosis ohne Schädigung übersteht als feuchter.

Um festzustellen, welche SO_2 -Dosis erforderlich ist, um eine analoge Schädigung bei trockenem Pollen zu erzielen, wurden Vorversuche an *Picea abies* mit $600\mu\text{g}/\text{m}^3$ SO_2 über drei und vier Tage und $800\mu\text{g}/\text{m}^3$ SO_2 über vier Tage durchgeführt (vgl. Abschn. 2.3.3.2). Dieser Versuch wurde an Pollen von *Picea abies* durchgeführt, da zum Versuchszeitpunkt kein Pollen von *Picea omorika* zur Verfügung stand.

2.4.1 Auswahl und Standort der Mutterbäume

An *Picea abies* war der Blütenbesatz für den geplanten Bestäubungsversuch nicht ausreichend. Bei der Serbischen Fichte ist im Gegensatz zur *Picea abies* eine regelmäßige, jährliche Fruktifikation zu erwarten. Sie bildet kleinere ♀ Blüten, deren Befruchtungsbereitschaft (Fängigkeit) sich auf eine kürzere Zeitspanne beschränkt. Außerdem ist, bedingt durch ihr kleinräumiges natürliches Verbreitungsareal, eine geringere genetische Variation anzunehmen.

Aus diesen Gründen wurde der Bestäubungsversuch im Forstlichen Versuchsgarten Grafrath an *Picea omorika* Purk. durchgeführt. Auf einen unmittelbaren Vergleich mit den Pollenkeimungsversuchen mußte dadurch verzichtet werden.

Ausgewählt wurden fünf fünfzigjährige Randbäume an der Westseite eines Kleinbestandes, der auf kalkreichem, mäßig frischem, kiesig-sandigem Lehm stockt. Der Versuchsgarten liegt im Oberbayrischen Jungmoränengebiet mit durchschnittlich 460mm Niederschlag während der Vegetationsperiode von Mai-Aug und 7,2°C Jahresmitteltemperatur.

2.4.2 Pollengewinnung und -präparation

Von sieben der oben beschriebenen Bäume wurden am 9.5.1987 Zweige mit starkem männlichen Blütenbesatz geerntet und zur Nachreife im Labor 4 Tage in Wasser gestellt (s. Abschn. 2.1.1). Danach öffneten sich die bei der Ernte noch verschlossenen Blüten und entließen den Pollen bei leichtem Antippen der Zweige auf die ausgelegten Papierbögen. Der Pollen wurde gesiebt, gemischt und in Einwegpetriscalen aus Kunststoff zur Begasung in das Institut für Forstgenetik und -pflanzenzüchtung der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft nach Schmalenbeck gebracht.

2.4.3 Begasung des trockenen Pollens

Die elektrostatische Anziehung der Kunststoffpetriscalen verhinderte ein Verdriften des Pollens in den Begasungsküvetten und erlaubte die Exposition des Pollens in eindimensionaler Lage. Die Mischproben wurden in mehrere gleichgroße Partien geteilt, und 3 (P3), 4 (P4) bzw. 5 (P5) Tage lang mit SO_2 begast. Die Kontrolle blieb unbegast. Temperatur und Luftfeuchte in den Expositionskammern wurden mit Lamprechtscheibern registriert. Wie erwartet, verliefen die aufgezeichneten Temperatur- und Luftfeuchtekurven der beiden, vom gleichen Luftstrom gespeisten, Küvetten analog. Das Schaltbild (Abb. 6) zeigt, wie die Luftströme geteilt wurden: $4\text{ m}^3/\text{h}$ die durch den Rotameter R_1 flossen erreichen die Kontrollküvette unverändert. Weitere $4\text{ m}^3/\text{h}$, die durch den Rotameter R_2 strömen, werden im Gasmischer mit $x\% \cdot 3\text{ ml/h SO}_2$ gemischt. Von diesem Gasgemisch werden $0,27\text{ m}^3/\text{h}$ durch

einen Kompressor zusammen mit 3,73 m³/h Reinluft aus dem Rotameter R₂ in den R₄ weitergepumpt. Die so entstehenden 4m³/h mit der von x abhängigen SO₂-Konzentration gelangen in die Begasungsküvette. Die SO₂-Konzentration in der Begasungsküvette errechnet sich wie folgt:

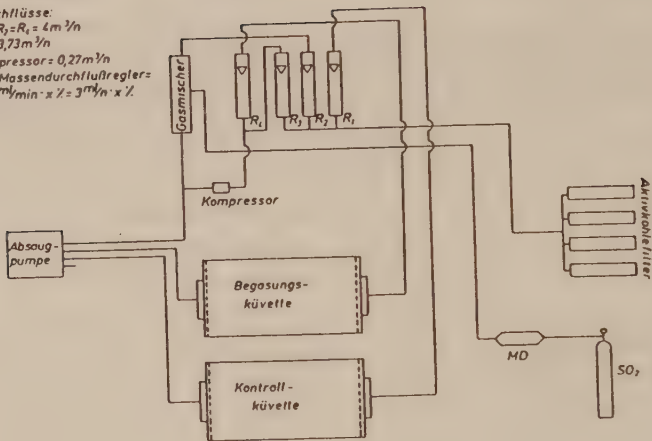
$$x\% \cdot \frac{3\text{ml/h}}{4 \text{ m}^3} \cdot \frac{0,27 \text{ m}^3/\text{h}}{4 \text{ m}^3} = 50,6 \text{ ppb} \cdot x\%$$

Hierbei entspricht 3ml/h dem Zufluß durch den SO₂ - Massendurchflußmesser, 0,27 m³/h der Kompressorleistung und 4 m³ der durch die Rotameter R₂ und R₃ zugeführten Reinluft. x ist der bestimmbare Verdünnungsfaktor, der für dieses Experiment 6% betrug. Daraus ergab sich nach obiger Formel eine theoretische SO₂-Konzentration von 304 ppb bzw. 816 µg/m³ für die Begasungsküvette. Diese wurde im diskontinuierlichen, halbstündigen Rhythmus mit der Pararosanilin-Methode im B&L Imcometer überprüft. Die analysierten SO₂ Mittelwerte schwankten 20µg/m³ um den angestrebten Mittelwert von 820µg/m³. Unmittelbar nach der Begasung wurde der Pollen in Petrischalen nach München zurücktransportiert und ohne Zwischenlagerung zur Bestäubung der isolierten weiblichen Blüten verwendet.

Abb. 6 Schaltbild der SO_2 -Begasung des trockenen Picea omorika Pollens

Zeichenerklärung:

Durchflüsse:
 $R_1 = R_2 = R_3 = 4 \text{ m}^3/\text{h}$
 $R_4 = 3,73 \text{ m}^3/\text{h}$
 Kompressor: $0,27 \text{ m}^3/\text{h}$
 MD: Massendurchflußregler =
 $\frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \cdot \pi \cdot \frac{\%}{\%} = 3 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \pi \cdot \frac{\%}{\%}$



2.4.4 Bestäubung

Um eine unkontrollierte Bestäubung zu vermeiden, wurden die weiblichen Blüten von 90 Trieben der oben beschriebenen Bäume am 9.5.87, vor Einsetzen des Pollenflugs, mit Pergamintüten isoliert. Jede Tüte enthielt 1-10, durchschnittlich 3, weibliche Blütenstände. Die zu bestäubenden Blütenstände wurden nach einem mehrstufigen Stichprobenverfahren ausgewählt. Anzahl und Verteilung der Behandlungsvarianten je Mutterbaum ist in Tab. 8 dargestellt. Um expositionsbedingte Einflüsse auf die Samenentwicklung zu vermeiden, wurden die verschiedenen Behandlungsvarianten gleichmäßig über die Krone verteilt.

TABELLE 8 Anzahl und Verteilung der Bestäubungstüten nach Pollenchargen je Mutterbaum

Baum- nr.	Pollencharge				Summe
	K4	P4	P3	P5	
1	4	4	4	4	16
2	5	4	4	5	18
3	4	3	3	4	14
4	6	5	5	6	22
5	5	5	5	5	20
Summe	24	21	21	24	90

K4: Kontrollpollen, 4 Tage exponiert

P4: 4 Tage mit $820\mu\text{g}/\text{m}^3$ SO_2 begaster Pollen

P3: 3 Tage mit $820\mu\text{g}/\text{m}^3$ SO_2 begaster Pollen

P5: 5 Tage mit $820\mu\text{g}/\text{m}^3$ SO_2 begaster Pollen

Der Pollen P3, P4, P5 und K4 wurde am 23.5 und 24.5.87 mithilfe eines Bestäubungsgeräts auf die empfängnisbereiten Blüten in die Tüten geblasen, die mit Klebestreifen wieder abgedichtet wurden. Einige isolierte Blüten blieben zu Kontrollzwecken unbestäubt und einige weibliche Blüten wurden aus dem gleichen Grund der freien Abblüte und Entwicklung überlassen.

Verschiedenfarbige Plastiketiketten markierten die unterschiedlichen Versuchseinheiten. Die Pergamenttüten wurden am 30.6.1987 entfernt.

2.4.5 Auswertung

Die Zapfen mit den reifen Samen wurden am 7.11.1987 geerntet und nach Bestäubungstüten getrennt sorgfältig im MEMMERT Brutschrank bei 30°C 24h lang geklenget. Die alleine durch den Klengprozess entlassenen Samen repräsentierten nicht den tatsächlichen Hohlkornanteil. In den Zapfen blieb eine unterschiedlich große Anzahl hohler Samen zurück. Deswegen mußten die Zapfen mechanisch zerkleinert werden. Zunächst wurde der Anteil der Hohlkörner, die sich in Größe (höchstens 2/3 der Normalgröße) und Farbe (graubeige statt braunschwarz) von den regulär entwickelten Samen unterschieden, ermittelt und ausgeschieden. Die restlichen, äußerlich identischen Samen wurden im FAXITRON N 43804 Röntgenapparat der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt bei 20kV, 90sec auf der untersten Schiene geröntgt. Zuvor wurden die Samen in regelmäßig angeordneten Vertiefungen einer Plastikplatte aufgebracht, und diese dann direkt auf dem Röntgenfilm plaziert (AGFA GEVAERT STRUCTURIX D4). Die Aufnahmen wurden mit GEVAERT Feinkornentwickler "150" fünf Minuten bei 20°C entwickelt und fünf Minuten fixiert. Im Röntgenbild ließen sich Embryogröße, Hohlkornanteil, und Insektenbefall feststellen. Anschließend wurde das Tausendkorngewicht des lufttrockenen Samens mit einer SARTORIUS Waage Typ 1413 auf 0,001g genau bestimmt.

2.5 Freilanderhebungen

Die nachfolgend beschriebenen Erhebungen über die Pollen-vitalität bei Kiefer und Fichte und über die Fruktifikation bei Fichte sollten klären, ob Zusammenhänge zwischen dem Schadensgrad des Einzelbaumes, ausgedrückt im Nadelverlust und den genannten generativen Merkmalen bestehen. Vorweg mußte die Konstanz dieser Eigenschaften unter verschiedenen Umweltbedingungen und ihre genetische Varianz ermittelt werden.

In den Jahren 1985/86, örtlich auch 1987, war die Fichtenblüte gering. Einige Voruntersuchungen wurden deshalb an Kiefer durchgeführt.

2.5.1 Wahl der Probeflächen

Alle Probeflächen lagen im Wuchsgebiet 13.2/1 Südliche Münchner Schotterebene in zwei unterschiedlich stark vom Waldsterben betroffenen Forstämtern. In Sauerlach, Distrikt XIII Brunnicket (Abb. 7a) wurden schon 1981 erste Schäden bei Fichte beobachtet (SCHÖTT, mündliche Mitteilung). Später wurden dort Versuchsflächen mehrerer Lehrstühle der forstlichen Fakultät, sowie der FVA München eingerichtet.

Die Waldschadensaufnahme der FVA München ergab 1984 für diese Fläche einen Schadgrad bei Fichten-Alt bäumen von 68%, d.h. 68% der Altfichten sind den Schadklassen 2-4 zuzuordnen (MAIER 1985). 1987 betrug der Schadgrad der Fichten 70% (MAIER mündliche Mitteilung). Demgegenüber hatten die untersuchten Fichten in Fürstenfeldbruck 1987 ein Schadgrad von 43%.

In Sauerlach stockt der Bestand (90% Fi, 10% Kie) auf einer für die Fichte nicht optimalen, da flachgründigen

und mäßig trockenen bis mäßig frischen Parabraunerde, laut Standortoperat, Standortseinheit 12. Hier wurde 1987 Fichtenpollen (Bezeichnung mit dreistelliger Baumnummer) von 15 Randbäumen der Westseite des geschlossenen 100jährigen Bestandes gewonnen. Im Herbst wurde der Zapfenbehang von 50 Individuen aufgenommen und die Samenvitalität von 10 Fichten untersucht. (vgl. Abschn. 2.5.5). Die Pollenuntersuchung wurde 1988 an 25 Bäumen wiederholt. Auch der Zapfenbehang wurde 1988 nochmals an 50 Bäumen ermittelt. Zweimal im Jahr, sowohl bei der Pollenernte als auch bei der Samenernte, wurde der Schädigungsgrad der Spenderbäume geschätzt (vgl. Abschn. 2.5.2).

In Abb. 7a erkennt man parallel des Hauptweges eine Starkstromleitung. Die darunter liegende Fläche wird vom Forstamt als sogenannter Nichtholzboden nicht bewirtschaftet. Von den aus Anflug entstandenen ca. 25-40jährigen Kiefersolitärbäumen stammen die Sauerlacher Kiefernpollenproben.

In Fürstenfeldbruck wurde der Fichtenpollen im direkt an den beschriebenen Staatswald angrenzenden Gemeindewald von ebenfalls 100jährigen, randständigen, aber zur Ostseite exponierten, Fichten entnommen.

Der Kiefernpollen stammt von 30jährigen Kiefern zweier Bestände, der Standortseinheit 12 und 9, die an Wildäcker angrenzen. (Abb. 7b)

Die Ernte der Fichtenpollen erfolgte an zwei aufeinanderfolgenden Tagen mit unterschiedlichen Witterungsbedingungen: In Sauerlach wurde der Pollen bei trockener Wetterlage geerntet, in FFB nach Nieselregen bei hoher Luftfeuchte.

Abb. 7: Lage der Probebestände in den Forstämtern
Sauerlach und Fürstenfeldbruck

a) Forstamt Sauerlach

XIII Brunn Dicket Abteilung 1. Harthausen Geräumt und
Abteilung 2. Widder Geräumt a°



b) Forstamt Fürstenfeldbruck

IV Eichholz Abteilung 1. Untersulzbogen a° und
Abteilung 2. Eichgeräumtbogen 4



2.5.2 Schadansprache

Der Schädigungsgrad der beernteten Bäume wurde bei der Pollen- und der Zapfenernte nach den Richtlinien der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalten ermittelt. Danach sind Bäume mit 0-15% Nadelverlust (NV) der Schadklasse 0, zwischen 15 und 25% NV der Schadklasse 1, zwischen 25 und 65% NV der Schadklasse 2 und zwischen 65 und 99% NV der Schadklasse 3 zuzurechnen. Tote Bäume stellen die Schadklasse 4 (SCHRÖTER, ALDINGER 1985). Der Begriff "Schadgrad" bezeichnet nach MAIER (1985) den Prozentsatz der Individuen, die den Schadklassen 2-4 angehören.

2.5.3 Vorversuch zur Erntemethode

Fichten werden später mannbar als Kiefern, und ihre männlichen Blüten sind bevorzugt im oberen Kronendrittel inseriert. Dadurch ist Fichtenpollen schwieriger zu ernten als Kiefernpollen. In den Versuchsjahren 1986 und 1987 war außerdem die Fichtenblüte gering. Die im Abschnitt 2.5.4 beschriebenen Voruntersuchungen mußten deswegen teilweise an Kiefer durchgeführt werden. Die gewonnenen Ergebnisse wurden jedoch auf die Fichte übertragen und bei der Ernte von Fichtenpollen berücksichtigt.

Bei der Fichte wurden die Pollen auf verschiedene Weise gewonnen: Die Knospen männlicher Blüten stammen entweder von entwurzelten Bäumen, (Zeitpunkt der Entwurzelung unbekannt), von frisch gefällten Stämmen oder von stehenden Bäumen. Bei stehenden Fichten wurden die Äste entweder mit Schrot geschossen oder nach Möglichkeit (wie bei Kiefer) mit der Baumschere entnommen. Die Witterungsbedingungen zur Erntezeit wurden registriert.

2.5.4 Einfluß von Umweltfaktoren auf die Pollenkeimung

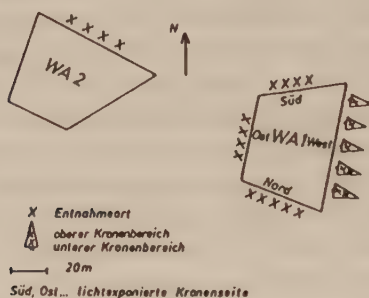
2.5.4.1 Einfluß kleinstandörtlicher Unterschiede

Im Distrikt IX Eichholz, FoA Fürstenfeldbruck (FFB) wurden mehrere Kleinstandorte für die Pollengewinnung ausgewählt, um den Einfluß kleinstandörtlicher Unterschiede auf die Pollenentwicklung zu ermitteln. Die beernteten 30jährigen Kiefern gleicher Vitalität umsäumten zwei 0,2 bzw 0,3 ha große Wildäcker. Nach Auskunft des Forstamts wurden die Kiefern zum gleichen Zeitpunkt gepflanzt, so daß anzunehmen ist, daß es sich um die gleiche Herkunft handelt.

Der mit WA 2 bezeichnete Wildacker (Abb. 7b; FFB: Abt. 2. Eichgeräumbogen e) gehört laut Standortoperat zur selben Standortseinheit 12 wie die Versuchsfläche in Sauerlach. Die mit WA 1 bezeichnete Fläche (Abb. 7b; FFB: Abt. 1. Untersulzbogen a³) ist als STOE 9 (mäßig trockene, kiesig sandige Lehme) schlechter wasser- versorgt als die Fläche WA 2, jedoch von gleicher Körnung. Inwieweit sich die Bodenunterschiede auf die Pollenkeimung auswirken, sollte durch den analogen Ansatz von Proben beider Standorte ermittelt werden.

Die Entnahmeorte der Proben sind aus der schematischen Darstellung in Abb. 8 ersichtlich.

Abb. 8: Schematische Darstellung der Probenentnahme an Kiefern im Forstamt Fürstenfeldbruck



2.5.4.2. Einfluß der Exposition

Wie aus Abb. 8 ersichtlich, waren die blühenden Kronenbereiche der Kiefern, die den Wildacker 1 (WA 1) umsäumten, in verschiedene Himmelsrichtungen exponiert. Auf die Pollenentwicklung haben deshalb unterschiedliche Licht- und Wärmeeinflüsse eingewirkt, deren Auswirkungen auf Pollenschlauchwachstum und Keimprozent quantifiziert werden sollte. Die Ernte der Pollen erfolgte an einem sonnigen, trockenen Tag um 14⁰⁰ Uhr.

2.5.4.3 Schwankungen innerhalb der Baumkrone

Um zu ermitteln, ob eine Pollenprobe unabhängig vom Entnahmeort innerhalb der Baumkrone als repräsentativ für die Pollenvitalität des Baumes angesehen werden kann, oder ob der Entnahmeort für vergleichende Untersuchungen standardisiert werden muß, wurden Proben aus dem obersten und dem untersten Kronenteil zweier Kiefer von WA 1 entnommen und für Keimprüfungen verwendet.

2.5.4.4 Einfluß des Reifegrades der Blüte

Der Einfluß der Blütenreife auf die Pollenkeimung wurde überprüft, indem Fichtenpollen aus Sauerlach von unterschiedlich lang gestreckten Blüten zur Keimung angesetzt wurde.

Dabei wurden drei Reifestadien unterschieden: Blüten, die bei der Ernte noch völlig geschlossen waren (Knospen); Blüten, die auf dem Höhepunkt der Pollenentlassung waren (reif) und Blüten, die durch die Streckung ihrer Achse erkennen ließen, daß sie den größten Anteil der Pollen schon entlassen hatten (überreif).

2.5.5 Ermittlung des Zapfenbehangs und der Samenvitalität

An 50 Prohebäumen desselben Fichten-Bestandes im FoA Sauerlach, an dem auch die Pollenuntersuchungen vorgenommen wurden (Abschn. 2.5.1), wurde 1987 der Zapfenbehang per Fernglas ermittelt und photographisch dokumentiert. Von zehn Bäumen wurden Zapfen für weitere Untersuchungen geerntet.

Bestimmt wurden:

die durchschnittliche Samenzahl pro Zapfen,
das Tausendkorngewicht der Samen,
der Hohlkornanteil im Röntgenbild und
die Keimschnelligkeit.

Die Samen wurden durch Klengen der Zapfen gewonnen. 300 Samen pro Baum wurden wie unter 2.4.5 beschrieben gewogen und geröntgt. Die Keimschnelligkeit wurde ermittelt, indem 3x100 Samen auf mit Aqua demin. angefeuchtetem Filterpapier in einer Petrischale bei 22°C im beleuchteten Brutschrank exponiert wurden. Bis zum 21. Tag wurde alle drei Tage das Keimprozent ermittelt. Als gekeimt galten Samen, aus deren Testa die Keimwurzel mindestens 1mm hervorragte.

2.6 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung des Datenmaterials erfolgte mit den Programmpaketen BMDP (DIXON 1985) und SPSS/PC+ (NORUSIS 1986).

Die Pollenschlauchlänge erwies sich nach einer bestimmten Keimdauer als normalverteilt. (s. Abschn. 3.4.1.5.1). Zum Vergleich zweier mittleren Pollenschlauchlängen $\bar{x}$ wurde als statistischer Test daher der T-Test gewählt. Statistische Unterschiede wurden je nach den Gegebenheiten außerdem mit der Varianzanalyse, dem U-Test und dem χ^2 -Test abgesichert.

Die Signifikanz ist mit n.s. für nicht signifikant, mit * für eine Irrtumswahrscheinlichkeit α von 0,05%, mit ** für $\alpha < 0,01\%$ und mit *** für α kleiner 0,001 angegeben. Stichproben wurden nach einem mehrstufigen Stichprobenauswahlverfahren gewählt. In den nachfolgenden Tabellen werden für die einzelnen Stufen folgende Bezeichnungen und Abkürzungen verwendet:

1. Stufe: Anzahl der Pollen pro Petrischale

Zur Bestimmung der mittleren Pollenschlauchlänge ($\bar{x}$) innerhalb einer Petrischale wurden immer 100 ($N_P=100$) Pollenschläuche gemessen. Die Standardabweichung s_{dP} zwischen den einzelnen Pollen betrug, je nach Baumart zwischen 26 und 49. Dadurch wurde eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $< 5\%$ eingehalten.

Zur Ermittlung des Keimprozents dienten 200 Pollen ($N_P=200$) als Stichprobe.

2. Stufe: Anzahl der Petrischalen pro Behandlung
bzw. pro Pollenprobe bei Freilanderhebungen.

Die mittlere Pollenschlauchlänge (PSL) $\bar{x}$ einer Versuchsbehandlung wurde aus der mittleren PSL x von vier Proben errechnet. Für Laborversuche, die mit homogenem Material von nur einem Individuum durchgeführt wurden, betrug die Standardabweichung sd_i von $\bar{x}$ zwischen 1 und 9. Für die Erhebungen im Freiland lagen die Verhältnisse komplizierter, s. dazu intraindividuelle und genetische Varianz Abschnitt 3.4.1.5.3.

Generell bezeichnet N_i die Anzahl der Petrischalen einer Versuchsvariante, $\bar{x}$ den Mittelwert aus allen Petrischalen eines Versuchs und sd_i die Standardabweichung dieses Mittelwertes.

Analog gilt dies auch für die Erhebung des Keimprozents.

3. Stufe: Anzahl der Versuchswiederholung bzw. der
Baumindividuen bei Freilanderhebungen.

Die Laborversuche wurden unterschiedlich oft wiederholt. Die Anzahl der Wiederholungen ist mit N bezeichnet und bei den einzelnen Versuchsergebnissen angegeben. Der Mittelwert über alle Wiederholungen hinweg ist $\bar{x}$, seine Standardabweichung sd .

Bei Freilanderhebungen bezeichnet N die Anzahl der Baumindividuen, $\bar{x}$ den Mittelwert einer Gruppe und sd die Standardabweichung dieses Mittelwerts.

3. Ergebnisse

3.1. Pollenkeimung unter verschiedenen Versuchsbedingungen

Der Pollen der Pinaceae ist, wie Pollen generell, von einer robusten Außenhaut, der Exine, umgeben. Diese besteht zu 22% aus Sporopollenin, einem hochpolymeren Terpen, das gegen chemisch aggressive Substanzen wie z.B. Schwefelsäure und Kalilauge widerstandsfähig ist. (DENGLER & SCAMONI 1939). Erst bei der Keimung stülpt sich an der Apertur die chemisch labilere, aus Pektin und Cellulose bestehende Intine aus und entwickelt sich zum Pollenschlauch. Dieser Vorgang ist mit der Aufnahme von Wasser und den darin gelösten Substanzen verbunden und wird durch eine Vielzahl ökologischer Faktoren, wie Temperatur, rel. Feuchte der Umgebungsluft, elektromagnetische Wellen u.a. beeinflusst (s. Abb. 9).

Abb. 9 Gekeimter Pollen von *Picea abies* und beeinflussende Faktoren



Bei Pollenkeimversuchen, die den Einfluß von Makro- und Mikropollutanten testen sollen, müssen diese Randbedingungen so standardisiert werden, daß Veränderungen im Keimverhalten allein auf den Einfluß der Testsubstanz zurückzuführen sind. Dies ist nicht immer möglich, beispielsweise nicht bei Begasungsversuchen mit getrennten Luftströmen. Um die Ergebnisse derartiger Begasungsversuche dennoch interpretieren zu können, wurde in einer Reihe von Vorversuchen der Einfluß verschiedener Umweltparameter ermittelt.

3.1.1 Relative Luftfeuchtigkeit

Tabellen 9 und 10 zeigen die mittleren PSL von Fichte und Kiefer bei verschiedenen Umgebungsluftfeuchtigkeiten bei stehender Luft. Die geringen Unterschiede sind nicht signifikant.

Im untersuchten Luftfeuchtebereich hängt die relative Luftfeuchtigkeit in der unmittelbaren Umgebung des keimenden Pollens offensichtlich in erster Linie vom Dampfdruck der Agarplatte ab. Dieses Mikroklima wird erst dann durch die Umgebungsluftfeuchtigkeit beeinflusst, wenn die laminare Luftschicht über der Agarplatte ständig weggeführt wird, wie das bei Begasungsversuchen der Fall ist.

Die Reaktion auf strömende Luft unterschiedlicher relativer Luftfeuchte ist in Tab. 11 und 12 dargestellt.

Pollenschlauchlängen in Abhängigkeit von der rel. Luftfeuchte (LF) bei unbewegter Luft

TABELLE 9 PSL von Fi 4 in μm (Versuchsdauer 48h; $N_p=200$)

rel. LF	Probe	Pollenschlauchlänge in μm					
		1	2	3	4	$\bar{x}$	sd_1
93%		108	84	101	110	101	11,8
88%		117	103	99	113	108	8,4
83%		92	112	114	108	106	10,0
76%		102	112	/	94	105	9,0

TABELLE 10 PSL von Kie 46 in μm (Versuchsdauer 96h; $N_p=200$)

rel. LF	Probe	Pollenschlauchlänge in μm				$\bar{x}$	sd_1
		1	2	3	4		
93%		37	42	38	35	38	2,9
88%		38	42	46	33	40	5,6
83%		37	38	35	41	38	2,5
76%		31	34	45	33	36	6,3

Pollenschlauchlängen in Abhängigkeit von der rel. Luftfeuchte (LF) bei strömender Luft

TABELLE 11 PSL von Fi 4 in μm (Versuchsdauer 48h; $N_r=250$)

rel. LF	Probe	Pollenschlauchlänge in μm					
		1	2	3	4	5	$\bar{x}$ sd_1
> 95%		100	84	113	99	105	100 11
> 95%		112	106	89	82	90	96 13
82-89%		91	97	106	74	105	95 13
70-86%		84	100	103	88	116	98 13
67-74%		90	104	99	94	/	97 6

TABELLE 12 PSL von Kie 46 in μm (Versuchsdauer: 96h;
 $N_F=200$)

rel. LF	Probe	Pollenschlauchlänge in μm					$\bar{x}$	sd _i
		1	2	3	4	5		
	>95%	34	35	39	37	36	36	2
	>95%	44	36	34	35	36	37	4
	82-89%	29	27	29	34	/	30	3
	70-86%	27	25	28	23	/	26	2
	67-74%	27	33	31	27	/	30	3

Fichtenpollen (Keimdauer 48h) entwickelt im Luftfeuchtebereich von 67->95% auch bei strömender Luft stets Pollenschläuche gleicher Länge. Die in Tab. 11 erkennbaren geringen Unterschiede sind statistisch nicht absicherbar. Anders dagegen bei der Kiefer mit einer längeren Keimdauer von 96h: Die Verringerung (Tab. 12) der Pollenschlauchlängen bei Luftfechtigkeiten unter 95% gegenüber den entsprechenden Werten bei mehr als 95% Luftfeuchte ist statistisch gesichert ($\alpha \leq 0,05$).

Bei längerer Exposition findet vermutlich eine Austrocknung der Agarplatte statt, so daß die rel. Luftfeuchtigkeit in der unmittelbaren Umgebung des Pollens sinkt.

3.1.2 Lufttemperatur

Die Temperatur spielt bei physiologischen und chemischen Prozessen eine wesentliche Rolle. Inwieweit jedoch Temperaturdifferenzen von $\pm 2^{\circ}\text{C}$, wie sie unter den gegebenen Bedingungen nicht vermeidbar waren, die PSL beeinflussen, ist in Tab. 13 und 14 dargestellt.

TABELLE 13 PSL von Fi 4 in μm in Abhängigkeit von der Lufttemperatur (Temp.) (Np=150)

Probe Temp.	1	2	3	$\bar{x}$	sd ₁
17° C	85	96	80	87	8
20° C	120	115	107	114	7
21° C	117	118	126	120	5
19-23° C	115	102	100	106	8
23° C	126	144	144	138	10
24° C	138	138	124	133	8
26-28° C	128	117	136	127	10

TABELLE 14 PSL von Kie 46 in μm in Abhängigkeit von der Lufttemperatur (Temp.) (Np=150)

Probe Temp.	1	2	3	$\bar{x}$	sd
20-21° C	31	38	21	30	9
21-22° C	28	27	30	28	2
22-23° C	26	23	27	25	2
24° C	35	36	32	34	2
25-28° C	23	21	23	22	1

Bei 17°C war das Wachstum der Pollenschläuche von Fichte mit $87\mu\text{m}$ stark verlangsamt. Im Temperaturbereich von $19-28^{\circ}\text{C}$ entwickelten Fichtenpollen im Gesamtdurchschnitt PSL von $120\mu\text{m}$ Länge, Kiefernpollen solche mit $28\mu\text{m}$ Länge.

Unter optimalen Temperaturbedingungen, die bei beiden Objekten bei konstant 23°C bzw. 24°C liegen, weicht die PSL der Fichte um 15% von diesem Mittelwert ab, die der Kiefer um 20%. Das bedeutet, daß schon geringe Temperaturdifferenzen und -schwankungen von 1°C die Ergebnisse beeinflussen können.

3.1.3 Licht

Unter Licht im engeren Sinne versteht man das sichtbare Lichtspektrum von 380 - 760nm. Energie in Form elektromagnetischer Wellen, die mit biologischen Systemen in Wechselwirkung tritt, indem sie Elektronen aus Molekülverbänden ionisiert. Diese Ionisation wird in der Photosynthese zur Energiegewinnung genutzt, kann andererseits auch Schäden an biologisch wichtigen Molekülen (Membranen, Enzymen) verursachen (ELSTNER 1986). Physiologische Vorgänge, wie z.B. die Samenkeimung, können bei der einen Art lichtabhängig, bei der anderen lichtunabhängig verlaufen.

Daß auch das Pollenschlauchwachstum von unterschiedlichen Lichtbedingungen beeinflusst wird, geht aus Tab. 15 hervor. Eine der Versuchsreihen fand unter natürlichen Tageslichtbedingungen statt, schloß also den Wechsel der Licht- und Dunkelpphase sowie die starken Schwankungen der Lichtintensität im Tagesverlauf ein. (Tab. 15: Natürl. Tageslicht). Die Versuchvariante 00-20 Microein-

stein/m²/sec war am beschatteten Nordfenster exponiert, die Variante 00-300 Microeinstein/m²/sec am Südfenster mit direkter, nach Bewölkung wechselnder Sonneneinstrahlung. Die Dunkelproben waren daneben aufgestellt, aber durch schwarzen Fotokarton vor jeder Lichteinwirkung abgeschirmt.

Unter definiertem, konstantem Lichteinfluß wurde dieses Experiment mit einem TRUE-LITE Lichthimmel nachgefahren (Tab. 15 Pkt 2.). Auch hier zeigte sich eine Abnahme der mittleren PSL mit steigender Lichtintensität. Bei 300 Microeinstein/cm²/sec unterblieb jegliche Keimung.

Die Pollen keimten zu um so längeren Pollenschläuchen aus, je weniger Licht sie während der Keimung ausgesetzt waren (vgl. Abschn. 3.2.2).

Der Unterschied zwischen den einzelnen Behandlungsvarianten und der Dunkelprobe war auf dem *** Signifikanzniveau absicherbar.

TABELLE 15 Mittlere PSL in μm von Fichtenpollen in Abhängigkeit vom Lichteinfluß ($N_r=300$)
M^{*} hier: Microeinstein

Lichtqualität und - quantität	Pollenschlauchlänge	
	$\bar{x}$	sd ₁
1. Natürl. Tageslicht		
00-300 M [*] /m ² /sec	76	5
00- 20 M [*] /m ² /sec	134	11
Dunkelprobe	147	13
2. Künstl. Licht mit True Lite Lichthimmel		
300 M [*] /m ² /sec	0	0
50 "	73	4
20 "	130	9
00 "	143	8

3.1.4 pH-Wert

Zur Überprüfung des pH-Einflusses wurde Fichtenpollen in unterschiedlich saurem Milieu zum Keimen angesetzt: Eine erste Versuchsreihe auf Wasseragar mit pH 5,4, pH 4,5 und pH 3,5 zeigte einen starken Rückgang der PSL mit zunehmender H^+ -Ionen-Konzentration im Nährmedium (Tab. 16). Eine weitere mit den pH-Stufen 5,9; 5,2; 5,1 und 4,8 sollte in einem engerem pH-Wert-Bereich prüfen, bei welcher H^+ -Ionenkonzentration die Hemmung des Pollenschlauchwachstums einsetzt. Der pH-Wert 5,9 entspricht dabei der Nährplatte ohne Zusatz von H_2SO_4 . Schon geringe pH-Wert-Absenkungen führen zur Ausbildung von kürzeren Pollenschläuchen (Tab. 17). Hierbei muß allerdings offenbleiben, ob die Wirkung allein von der H^+ -Ionen-Konzentration ausgeht, oder auch durch H_2SO_4 direkt mitbeeinflusst wird. Alle Agarplatten mit H_2SO_4 -Zusatz zeigen unabhängig vom pH-Wert annähernd etwa die gleiche mittlere PSL (Tab. 17), allerdings waren die Unterschiede im pH-Wert auch gering. NAKADA et al. (1980) führt die Reduktion bei *Camellia japonica* alleine auf die H^+ -Ionen-Konzentration zurück, da er bei Verwendung von verschiedenen Säuren bei gleichem pH-Wert zu gleichen Ergebnissen kam.

TABELLE 16 Einfluß des pH-Werts (3,5-5,4) der Agarplatte auf d. mittlere PSL von *Picea abies* (Nr je Versuchsreihe =400)

Versuchsreihe	1	2	1	2
pH-Wert	PSL in μm		Signifikanz	
5,4	156	132		
4,5	128	107	***	***
3,5	95	51	***	***

TABELLE 17 Einfluß des pH-Werts (4,8-5,9) der Agarplatte auf d. mittlere PSL in μm von *Picea abies* (Nr =400)

pH-Wert	PSL	Sig. gg. pH 5,9
5,9	142	
5,2	117	***
5,1	117	***
4,8	116	***

Diese Ergebnisse stimmen mit den Beobachtungen von COX (1983) überein, der ebenfalls über Verkürzung der Pollenschlauchlänge bei Pinaceae (*Picea mariana*, *Pinus banksiana*, *P. strobus*, *P. resinosa*, *Tsuga canadensis*) berichtet, wenn diese in saurem Milieu keimten.

KARNOSKY & STAIRS teilen mit, daß SO_2 bei Begasung mit hoher Konzentration (1400ppb) vom Nährmedium absorbiert wird, dies wiederum führt zum Absinken des pH-Werts. Nach obigen Ergebnissen ist alleine aufgrund der Ansäuerung des Nährbodens ein Effekt auf die PSL zu erwarten. Um eine direkte SO_2 -Wirkung auf die Pollenschlauchent-

wicklung festzustellen, sollten die Agarplatten gepuffert werden.

Die dem Nährmedium zugegebenen Pufferlösungen hemmten jedoch das Pollenschlauchwachstum ebenfalls (Tab. 18). Der Einfluß war sogar größer als durch eine mit H_2SO_4 analog eingestellte pH-Erniedrigung (vgl. Tab. 17). Dabei erwies sich Citratlauge bei gleicher Vol%-Konzentration als weniger toxisch für die Pollenkeimung als Citratsäure. Bei höheren Konzentrationen (mehr als 5Vol%) waren Pollen zu beobachten, bei denen sich das Cytoplasma von der Pollenwand löste. Insgesamt übten die Pufferlösungen eine zu intensive Wirkung auf die Pollenkeimung aus, als daß sie bei Begasungsexperimenten verwendet werden konnten.

TABELLE 18 Mittlere PSL (x) von Fichtenpollen unter dem Einfluß von Citratsäurepuffer (pH 4,0) und Citratlaugepuffer (pH 5,0)

Behandlung	Vol% pH-Wert	PSL in μm
Kontrolle	5,9	142
Citratsäure 1%	4,8	92
Citratsäure 0,5%	5,1	114
Citratsäure 0,25%	5,3	121
Citratlauge 1%	5,4	112
Citratlauge 2%	5,3	102
Citratlauge 5%	5,2	54

Wie die Vorversuche zeigen, hat die Wahl der Keimbedingungen großen Einfluß auf die Pollenkeimung. Die Keimschlauchlänge reagiert schon auf geringfügige Änderungen der Temperatur, auf Unterschiede des Lichtgenusses oder im pH-Wert. Insbesondere beeinflussen dem Nährmedium zugefügte Substanzen, wie Pufferlösungen oder Fungizide die Keimung, selbst in niedrigen Konzentrationen. Um Vorschädigungen des Pollens auszuschließen, wurde auf diese Zusätze zum Nährmedium verzichtet.

Generell lassen sich in künstlichen Systemen in vivo Bedingungen der Pollenkeimung nur unzureichend imitieren. In keinem Fall sind sie so günstig wie die Verhältnisse auf der Narbe oder der Samenanlage (DÖPP 1931).

3.2 Wirkung chemischer und physikalischer Pollutantien auf die Pollenkeimung

3.2.1. Im Wasser gelöste Stoffe

Im Niederschlag, sei es feindispersiert als Nebel oder als Schnee und Regen, sowie in der Luft werden eine unüberschaubare Zahl von organischen und anorganischen Komponenten nachgewiesen. (ANONYMUS (1986b), GAFFNEY et al (1987); KRISTEN Natec, Hamburg, persönliche Mitteilung 1987; FRANK (1988), FRANK & FRANK (1986)) Ihre Wirkung auf Pflanzen und deren Stoffwechselvorgänge ist weitgehend unerforscht. Aufgrund der geringen Konzentrationen, in denen die meisten organischen Komponenten vorkommen, hat man ihnen bisher nur geringe, allenfalls lokale Bedeutung beigemessen. In jüngster Zeit entstehen jedoch immer mehr Hypothesen, die den Mikropollutantien eine Funktion bei der Entstehung der Waldschäden zuschreiben (FRANK & FRANK 1986, FRANK 1988, MASUCH et al 1986, FAULSTICH 1984).

Zumeist gründen sich diese Erklärungsansätze auf Übereinstimmungen zwischen dem Konzentrationsverteilungsmuster und dem Ausmaß des Waldsterbens (FRANK 1986). Hier soll der Einfluß von Mikropollutantien auf die Pollenkeimung getestet werden.

Triethylblei

Triethylblei ist ein Derivat des als Antiklopfmittel dem Benzin zugesetzten Tetraethylbleis, das von FAULSTICH (1985) in Regenwasserproben in Konzentrationen bis $0,3\mu\text{Mol}$ nachgewiesen wurde. Diese Konzentration wird allerdings von UNSWORTH & HARRISON (1985) bezweifelt.

Für Sojabohnen erwies sich eine Dosis von $1\mu\text{Mol}$ über 9 Tage als tödlich. Als Wirkungsmechanismus wird die selektive Hemmung der Mitose beschrieben, die zur Bildung von Riesenzellen mit hochgradig polyploiden Zellkernen oder zu drastischen Wachstumshemmungen führt (RÖDERER 1985).

Wie Tab. 19 zeigt, beeinträchtigt Triethylblei die Keimung von Fichtenpollen bereits in einer Konzentration von $0,1\mu\text{Mol/l}$. Das Keimprozent ist um 50% gegenüber dem Kontrollwert reduziert. Mit zunehmender Konzentration sinkt das Keimprozent bis auf 1% bei $10\mu\text{Mol/l}$. Die Werte sind gegenüber dem Kontrollwert signifikant (***) verschieden.

TABELLE 19 Keimprozent von Fichtenpollen Fi 4 unter Einfluß von Triethylblei.

Konzentration in $\mu\text{Mol/L}$	Keimprozent	
	$\bar{x}$	sd _i
Kontrolle	31%	8,5
0,1 μMol	15%	2,4
0,5 μMol	9%	1,5
1,0 μMol	12%	1,0
5,0 μMol	8%	3,7
10,0 μMol	1%	1,0

Lösliche Fraktion von Autoabgasen (Kondensat)

Das Kondensat war a priori mit Eubakterien und Archaeobakterien kontaminiert, die sich auf dem Nährmedium rasch ausbreiteten und die Pollenkeimung stark

behinderten. Kaum angekeimte Pollen wiesen geplatzte Pollenschläuche auf. Die Pollen keimten nur in der schwächsten Kondensatkonzentration von 1% mit einem Prozentsatz von 6% im Vergleich zu 24% der Kontrolle. Dabei ließ sich nicht feststellen, inwieweit diese Keimstörungen durch das Kondensat oder durch die Mikroorganismen bedingt waren.

Trichlorethen, Tetrachlorethen, Tetrachlorkohlenstoff

Tri- und Tetrachlorethen werden in Konzentrationen bis $98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in der Luft gemessen (FRANK 1986). Diese, von Unternehmen der chemischen Reinigung und der Lösungsmittelindustrie emittierten Chlorkohlenwasserstoffe bilden ein Konzentrationsverteilungsmuster, das Parallelitäten zum Auftreten des Waldsterbens aufweist (FRANK 1986). Sie sind nicht oder nur sehr schwer wasserlöslich. Für nicht wasserlösliche Substanzen beträgt die Löslichkeit bis 100ppm, für sehr schwer wasserlösliche zwischen 100-1000ppm (RÖMPP 1986). Konzentrationen dieser Substanzen von 100ppm in Aqua demin. sind daher möglich. Bei der Keimung von Fichtenpollen in wässrigen Lösungen mit jeweils 100ppm der genannten Stoffe ergaben sich die in Tab. 20 aufgeführten Keimprozente.

TABELLE 20 Keimprozent von Fichtenpollen Fi 4 in wässrigen Lösungen von Chlorkohlenwasserstoffen (100ppm) ($\bar{x}$ von $N_1=4$)

Behandlung	Keimprozent
Kontrolle	45%
Trichlorethen	47%
Tetrachlorethen	31%
Tetrachlorkohlenstoff	43%

100 ppm Trichlorethen hatte keine Wirkung auf das Keimprozent des Fichtenpollens, ebenso wie 100ppm Tetrachlorkohlenstoff. Demgegenüber reduzierte 100ppm Tetrachlorethen das Keimprozent um 30% gegenüber der Kontrolle (**).

Die Wirkung auf die Pollenschlauchlänge wurde auf Wasseragarplatten geprüft (Tab. 22).

H₂O₂

H₂O₂ führte, in Konzentrationen von 1-5ppm in Nebel gelöst, bei jungen Fichten zu Nadelschädigungen, die den Symptomen der Waldschäden ähneln (MASUCH et al. 1986).

H₂O₂ ist nicht stabil. Für die Dauer der Fichtenpollenkeimung von 48h ist jedoch eine stabile Konzentration von 5ppm und von 10ppm in Aqua demin. gewährleistet (Mitteilung der Herstellerfirma MERCK). Anders dagegen, wenn es der Agarlösung zugegeben wird: durch den organischen Bestandteil wird H₂O₂ innerhalb weniger Minuten reduziert. Beim Pollenkeimungstest auf Wasseragar, mit dem die PSL geprüft wurde, ist daher kein Effekt zu erwarten (s. Tab 22). Um die Wirkung auf das Keimprozent zu prüfen wurde H₂O₂ in demineralisiertem Wasser in Konzentration von 5ppm und 10ppm gelöst.

TABELLE 21 Wirkung von 5ppm und 10ppm H_2O_2 in Aqua demin. auf das Keimprozent von Fichtenpollen Fi 4 ($N_1=4$)

Behandlung	Keimprozent
Kontrolle	45%
5ppm H_2O_2	45%
10ppm H_2O_2	34%

Während H_2O_2 in einer Konzentration von 5ppm noch keine Wirkung auf das Keimprozent von Fichtenpollen zeigt, sinkt das Keimprozent um 25% gegenüber der Kontrolle, wenn die H_2O_2 Konzentration 10ppm beträgt (Sig. ***).

Für Untersuchungen zur Ermittlung der Pollenschlauchlänge wurden die Testsubstanzen einer 50°C warmen Agarlösung zugegeben. In Tab. 22 sind die ursprünglich angesetzten Konzentrationen aufgeführt. Durch die Zugabe zum warmen Keimmedium ist wahrscheinlich ein Teil der Testsubstanzen verdampft, so daß die tatsächlichen Konzentrationen wesentlich niedriger liegen dürften. Diese konnten aus methodischen Gründen nicht ermittelt werden, von einer Staffe lung der Konzentrationen wird jedoch ausgegangen. Die Mittelwerte der Pollenschlauchlängen, die sich auf den so präparierten Agarplatten entwickelten, sind in Tab. 22 dargestellt.

TABELLE 22 PSL von Fichtenpollen Fi 4 unter Einfluß von Mikropollutanten in Abhängigkeit von deren Konzentration ($N_1=4$).

Behandlung u. Konzentration	Pollenschlauchlänge in μm	
	$\bar{x}$	sd ₁
Kontrolle	136	8
Tetrachlorethen 200ppm	94	11
Tetrachlorethen 500ppm	93	10
Tetrachlorethen 800ppm	85	1
Tetrachlorkohlenstoff 200ppm	95	4
Tetrachlorkohlenstoff 500ppm	70	9
Trichlorethen 500ppm	136	6
Trichlorethen 800ppm	131	3
H ₂ O ₂ 50ppm	133	13
H ₂ O ₂ 110ppm	139	6

Wie erwartet, unterscheidet sich die Wasserstoffsuperoxidbehandlung nicht von der Kontrolle, obwohl mit weitaus geringerer Konzentration (10ppm) in Aqua demin. ein Rückgang des Keimprozentos erzielt worden war. Die Wirkung von H₂O₂ ist mit dieser Methode nicht überprüfbar.

Trichlorethen zeigte bis zu einer Konzentration von 800ppm keine Auswirkungen auf das Pollenschlauchwachstum. Tetrachlorethen und Tetrachlorkohlenstoff hemmten die Pollenschlauchlänge mit zunehmender Konzentration um 35% bis zu annähernd 50% (Cl₄C).

3.2.2 Elektromagnetische Wellen und Felder

Sonnenlicht enthält das gesamte Spektrum elektromagnetischer Wellen - von extrem langwelligen Radiowellen über infrarote Wärmestrahlung, das sichtbare Licht, die kurzwelligen UV-Strahlen bis hin zu Röntgen- und Gammastrahlen.

Die biologisch schädlichen kurzwelligen Bereiche des Spektrums werden größtenteils in der Stratosphäre durch die Ozonschicht absorbiert.

Durch fortlaufende Zerstörung der Ozonschicht hauptsächlich durch Fluorchlorkohlenwasserstoffe, sowie reduzierende Stickoxide ist mit einer Verschiebung des UV-Spektrums zu kürzeren Wellenlängen zu rechnen (TEVINI 1982). Des weiteren führen Fortschritte in Kommunikationstechnik und Naturwissenschaft zu einer Zunahme der Strahlenbelastung in verschiedenen Wellenbereichen (ELSTNER 1982). Augenfällige Emittenten sind Radarstationen, Kernreaktoren (METZNER 1984), Satelliten und Radiosender.

Verschiedene Autoren (HOMMEL 1985, KAS 1985, SCHULTE-UEBBING 1985, VOLKRODT 1986, METZNER 1984) vermuten einen Zusammenhang zwischen zunehmender Wellenemission und Waldschäden.

Als Wirkungsmechanismus von kurzwelligen Strahlen wird ein schädigender Einfluß auf das Zellstreckungswachstum und die Zellteilungsrate beschrieben (SISSON & CALDWELL 1976, DICKSON & CALDWELL 1978). Da die Pollenkeimung in erster Linie mit der Streckung der vegetativen Zelle und anschließender Zellteilung einhergeht, ist diese Phase möglicherweise gegenüber Strahlung, zumindest gegenüber dem kurzwelligen Bereich, sensibel.

Aus diesem Grunde wurde die Wirkung von Strahlen unterschiedlicher Wellenlänge auf keimende Pollen untersucht.

Spektralbereich des sichtbaren Lichts (390-760nm)

Die Wirkung des sichtbaren Lichtspektrums auf die Pollenkeimung wurde schon unter Abschn. 3.1.3 im Rahmen der Vorversuche abgeklärt (Tab. 12). Dabei war eine Verkürzung der mittleren PSL mit zunehmender Lichtintensität festzustellen.

UV-Strahlung (200-400nm)

Die Keimung von Pollen unter UV-Einstrahlung ist gegenüber der Dunkelkeimung erheblich reduziert. In 10cm Abstand von der Strahlenquelle unterblieb jegliche Keimung. Keimprozent und PSL bei Keimung in 20cm von der Strahlungsquelle sind aus Tab. 23 ersichtlich.

TABELLE 23 Keimprozent (K%) u. PSL von Fichtenpollen Fi 4 unter UV-Bestrahlung (Strahlungsquelle: 200 Watt Osram-UV Lampe; Abstand: 20 cm)

Behandlung	PSL in μm	Sig.	K%	Sig.
Kontrolle	112 μm		56%	
UV	44 μm	***	20%	***

Ultrakurzwellen (UKW) (Länge 3m) und Elektrisches Hochspannungsfeld

In diesem Abschnitt wird die Wirkung von Ultrakurzwellen (Frequenz: 98,5MHz; Feldstärke: 0,2V/m bzw. 0,6V/m) auf die Pollenkeimung beschrieben. Außerdem wird der Einfluß eines Hochspannungsfeldes von 50Hz, Feldstärke 2 bis 10KV/m, dargestellt. Beide Versuche verliefen räumlich und zeitlich parallel. In beiden Fällen waren die Pollen während ihrer gesamten Keimphase exponiert. Die Kontrolle befand sich in einem Faraday'schen Käfig.

Die Versuche wurden mehrmals wiederholt. Zur besseren Vergleichbarkeit sind die PSL in Prozent der jeweiligen Kontrolle ausgedrückt. Sie werden in Tab. 24 und 25 für Fichte und in Tab. 26 für Kiefer getrennt aufgeführt. Unterschiede zwischen Kontrolle und Behandlung von mehr als 10% sind für den Einzelversuch statistisch signifikant absicherbar (*).

Die Ergebnisse sind uneinheitlich und daher schwer zu interpretieren. So unterschied sich die Behandlung mit UKW von 0,2V/m Feldstärke im ersten Versuch durch einen um 10% höheren Längenzuwachs signifikant von der Kontrolle. Im Wiederholungsversuch blieb die gleiche Behandlung um 13% hinter der Kontrolle zurück. Die Bestrahlung mit 0,6V/m bewirkte keine Unterschiede im Vergleich zur Kontrolle.

Gravierende Unterschiede zwischen den Ergebnissen verschiedener Versuchsreihen lassen auf Einflüsse anderer Umweltbedingungen schliessen, die von größerer Bedeutung für die Pollenkeimung sind.

Wie die Voruntersuchungen zeigen, kommt als einer dieser Faktoren das Lichtangebot in Betracht. Die Proben waren den natürlichen Tageslichtbedingungen und damit Schwankungen im Lichtangebot je nach Sonnenstand und Wetterlage ausgesetzt. Dadurch könnten die von Versuchsdatum zu Versuchsdatum unterschiedlichen Reaktionen erklärt werden.

TABELLE 24 PSL (%) von unter UKW-Einfluß gekeimten Fi-Pollen Fi 4 in Prozent der Kontrolle.

Feld- stärke	Versuchs- datum	%	Sig.
0,2V/m	070286	110%	***
0,2V/m	080286	87%	***
0,6V/m	030386	106%	n.s.
0,6V/m	260386	106%	n.s.
0,6V/m	300386	103%	n.s.

TABELLE 25 PSL (%) von im 50Hz Hochspannungsfeld gekeimten Fi-Pollen Fi 4 in Prozent der Kontrolle

Feld- stärke	Versuchs- datum	%	Sig.
2KV/m	070286	100%	n.s.
2KV/m	080286	104%	n.s.
4KV/m	030386	113%	***
4KV/m	260386	94%	n.s.
4KV/m	300386	111%	***

TABELLE 26 PSL von im 50Hz Hochspannungsfeld (HSP) bzw. unter UKW-Einfluß (UKW) gekeimten Kiefern-pollen Kie 46 in Prozent der Kontrolle

Feld- stärke	Versuchsdatum			$\bar{x}$	sd
	230686	290786	010986		
	PSL in % (Kontrolle=100)				
HSP 10KV	96%	119%	111%	109%	12
5KV	89%	89%	118%	99%	17
2KV	82%	81%	107%	90%	15
UKW 0.6V/m	80%	120%	121%	107%	23

Röntgenstrahlen (1-10nm)

1. Kiefer

In einer ersten Versuchsreihe wurde geprüft, welcher Wellenbereich des spektralen Röntgenlichts Auswirkungen auf die Pollenkeimung zeigt. Dazu wurde Kiefernpollen am zweiten und dritten Tag der Keimung bei unterschiedlicher Anodenspannung im Röntgengerät für jeweils 15 Minuten exponiert. Es zeigte sich, daß die mittlere PSL der röntgenexponierten Pollen gegenüber der Kontrolle in allen Wellenbereichen zurückbleibt. Besonders deutlich ist dieser Effekt im Spektrum der mittellangen Röntgenstrahlen, die durch eine Anodenspannung von 50KV erzeugt werden (Tab. 28).

TABELLE 28 Mittlere PSL von röntgenexponierten Kiefernpollen Kie 46 in Abhängigkeit von der Anodenspannung Expositionsdauer: 2x 15 Min. (Nr=400)

Anodenspannung	PSL in μm		Sig.
	x	sd _r	
Kontrolle	61	24	
30KV	51	23	***
50KV	45	22	***
110KV	53	25	***

Anschließend wurde bei einer konstanten Anodenspannung von 50KV die Expositionsdauer variiert. Hier sinkt die mittlere PSL bei einer Expositionszeit von 60 Minuten deutlich ab, während sie bei kurzzeitiger (1Min. und 10Min) Exposition über dem Mittelwert der Kontrolle liegt (Tab. 29, Spalte 4).

Beim Keimprozent (Tab. 29, Spalte 2), ist hingegen eine kontinuierliche Abnahme mit zunehmender Expositionsdauer zu verzeichnen.

Die mittlere Pollenschlauchlänge bezieht sich nur auf die gekeimten Pollen. Kurzzeitig bestrahlte Pollen bilden im

Mittel zwar längere Pollenschläuche, weisen jedoch ein verringertes Keimprozent auf. Um diesen Umstand zu berücksichtigen, wurde das Produkt aus Keimprozent und Pollenschlauchlänge angegeben (Tab. 29, Spalte 6).

Offenbar keimen unter kurzfristiger Röntgenbestrahlung zuerst die weniger vitalen Pollen nicht mehr aus, so daß deren unterdurchschnittliche Pollenschläuche nicht mehr in die Berechnung des Mittelwerts eingehen. Dadurch tritt ein verfälschter, scheinbar höherer Mittelwert auf.

Bei zehnminütiger Expositionsdauer kann man daher nicht von einer Förderung des Pollenschlauchwachstums sprechen, nur bei der einminütigen Exposition ist die Pollenschlauchlänge gegenüber der Kontrolle leicht gefördert.

TABELLE 29 Keimverhalten von röntgenbestrahlten Kiefernpollen Kie 46 in Abhängigkeit von der Expositionsdauer bei einer Anodenspannung von 50KV ($N_1=5$; $N_2=500$)

1	2	3	4	5	6
Expositions- dauer	Keimprozent $\bar{x}$	sd_1	PSL in μm $\bar{x}$	sd_2	K%·PSL
Kontrolle	79	3	38	18	30
1 Min	72	4	44	21	32
10 Min	67	3	42	19	28
60 Min	69	3	32	21	22

2. Fichte

Die mittlere PSL röntgenstrahlenexponierter Fichtenpollen ist in allen Wellenbereichen unabhängig von der Expositionsdauer geringer als bei der Kontrolle. Wie bei Kiefernpollen, ist der Rückgang der mittleren PSL am stärksten, in dem durch die Anodenspannung von 50KV erzeugten Wellenbereich. (Tab. 30).

TABELLE 30 Keimverhalten von röntgenexponierten Fichtenpollen Fi 4 in Abhängigkeit von Expositionsdauer und Anodenspannung. ($N_1=5$, $N_p=500$)

Anoden- spannung	Expositions- dauer	PSL in μm		K%	
		$\bar{x}$	sd_1	$\bar{x}$	sd_1
30KV	1Min	101	8	53	2
	10Min	103	5	52	3
50KV	1Min	99	4	52	3
	5Min	98	9	49	3
	10Min	95	2	51	2
	45Min	102	6	48	3
110KV	1Min	100	4	52	4
	15Min	100	9	53	3
Kontrolle		114	6	54	4

Radar

Der keimende Pollen wurde am zweiten Keimungstag für kurze Zeitspannen zwischen einer und zehn Minuten Radarwellen unterschiedlicher Leistungsdichte ausgesetzt. Das Keimprozent und die PSL wurden bei der Fichte nach 48h, bei der Kiefer nach 96h ermittelt. In Tab. 31 sind die Einzelergebnisse für Fichte, in Tab. 32 für Kiefer dargestellt. Wegen der besseren Vergleichbarkeit der einzelnen Versuche untereinander sind in Tab. 31, Spalte 4 und 5 das Keimprozent und die PSL in Prozent des Kontrollwertes angegeben.

TABELLE 31 Keimverhalten von Fichtenpollen unter dem Einfluß der Radarbestrahlung in Abhängigkeit von der Expositionsdauer (Expo) und der Leistungsdichte (LD) der Strahlung (Kontr.=100%, $N_1=5$)

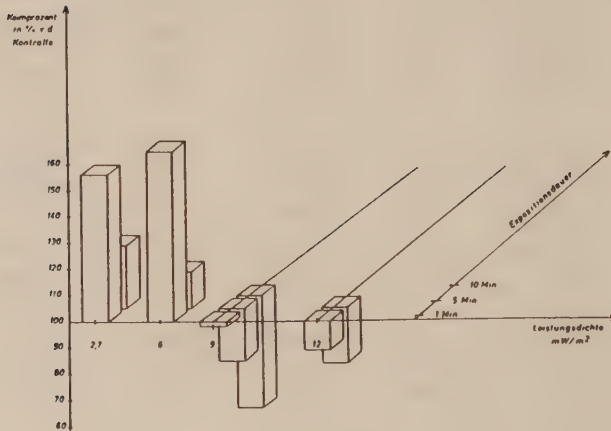
1 Versuchs- nummer	2 LD in mW/m ²	3 Expo Min	4 Keimrate	5 rel. PSL	6 PSLxK%
1901	2,7	1	150%	88%	131%
	6	1	161%	129%	210%
2301	2,7	1	162%	118%	141%
	6	1	167%	121%	150%
	2,7	5	124%	118%	108%
	6	5	114%	124%	104%
1102	9	1	100%	81%	81%
	12	1	89%	99%	88%
	9	5	75%	87%	65%
	12	5	85%	69%	58%
0604	9	1	92%	80%	73%
	9	5	73%	87%	64%
	9	10	63%	73%	47%
1504	9	1	98%	98%	96%
	9	5	90%	111%	98%
	9	10	71%	104%	74%

TABELLE 32 Keimverhalten (K% u. PSL) von Kiefernpollen unter Einfluß der Radarbestrahlung in Abhängigkeit von der Expositionsdauer (Expo) und der Leistungsdichte (LD) der Strahlung ($N_1=5$)

LD in mW/m ²	Expo Min.	Keim% $\bar{x}$ sd ₁	PSL $\bar{x}$ sd ₁	K%·PSL
Kontrolle		89 1	48 23	43
9	1	90 1	43 21	39
9	5	92 2	44 26	40
9	10	86 5	46 23	40

Zur Veranschaulichung des Keimprozents bei Fichte in Abhängigkeit von der Leistungsdichte und der Expositionsdauer dient Abb. 10.

Abb. 10: Keimprozent von radarbestrahltem Fichtenpollen Fi 4 in Prozent der Kontrolle in Abhängigkeit von der Leistungsdichte und der Expositionsdauer



Betrachtet man das Keimprozent und zwar zunächst in Abhängigkeit von der Leistungsdichte bei einer konstanten Exposition von einer Minute, (Abb. 10, vorderste Säulereihe), so zeigt sich, daß geringe Leistungsdichten ($2,7\text{mW/m}^2$ und 6mW/m^2) das Keimprozent des Fichtenpollens fördern, die Leistungsdichte von 9mW/m^2 keine Veränderung gegenüber der Kontrolle bewirkt und ab 12mW/m^2 eine Reduktion des Keimprozents eintritt.

Beobachtet man den Einfluß der Expositionsdauer bei konstanter Leistungsdichte, z. B. 9mW/m^2 , (Abb. 10: die dritte nach hinten in den Raum ragende Säulenlinie), so stellt man mit zunehmender Expositionsdauer (1-10Min.) einen Rückgang des Keimprozents von 100% auf 75% des Kontrollwertes fest. Diese Tendenz bestätigte sich in allen drei Versuchsreihen. Entsprechende Keimhemmungen fanden sich auch bei anderen Leistungsdichten: Bei niedrigen Leistungsdichten ($2,7$ und 6mW/m^2) geht die Keimförderung mit zunehmender Expositionsdauer zurück, bei der höheren Leistungsdichte 12mW/m^2 wird die Keimung mit zunehmender Expositionsdauer immer stärker reduziert.

Aus den Versuchsergebnissen ist zu folgern, daß kurze energiereiche Wellen, wie Röntgenstrahlen und Radarwellen die Pollenkeimung von Fichte und Kiefer in Abhängigkeit von ihrer Einwirkungsdauer beeinflussen. Längere Expositionsdauer hat eine Verminderung des Pollenschlauchwachstums bis hin zur Zerstörung der Keimkraft zur Folge. Bei kurzer Exposition (1 oder 5Min.) werden zuerst weniger vitale Pollen zerstört, wie der Rückgang des Keimprozents bei gleichzeitigem Anstieg der durchschnittlichen PSL zeigt.

Wellen dieser Länge bewirken eine Erwärmung des stark wasserhaltigen Nährmediums. Da geringe Temperaturänderungen von 1°C einen Einfluß auf das Pollenschlauchwachstum ausüben (s. Abschn. 3.1.2), kann eine unmittelbare Wirkung der Wellen auf den Zellmetabolismus nicht vom Temperatureffekt getrennt werden. Allerdings ist bei den kurzen Expositionszeiten (maximal 10Min. bei Radar-,

60Min. bei Röntgenstrahlen) eine reine Temperaturwirkung weniger wahrscheinlich.

Wellen des Spektralbereichs des sichtbaren Lichtes wirken hemmend auf die Pollenkeimung, wenn diese während der gesamten Keimdauer von 48h einwirken. Für Ultrakurzwellen mit 3m Wellenlänge ist ein Effekt ebensowenig nachweisbar wie für das statische System des elektrischen Hochspannungsfeldes.

3.2.3 Gase

3.2.3.1 Vorversuch

Agarplatten mit keimenden Fichtenpollen waren während ihrer 48stündigen Keimdauer niedrigen Dosen von Schadgasen ausgesetzt, namentlich SO_2 , O_3 und deren Kombination. Die mittleren Pollenschlauchlängen werden in Tab. 33 in Relation zur unbegasten Kontrolle (=100%) angegeben.

TABELLE 33 Rel. PSL von Fichtenpollen (B43) nach Begasung mit SO_2 und O_3 , sowie $\text{SO}_2 + \text{O}_3$ (Kontrolle=100%) ($N_1=5$) Spalte 3: Konzentration wie Spalte 1+2

Pollenschlauchlänge in % der Kontrolle (100%)					
1 SO_2		2 O_3		3 SO_2 und O_3	
36ppb SO_2	141%	50ppb O_3	130%	90%	
54ppb SO_2	128%	100ppb O_3	104%	82%	
73ppb SO_2	57%	150ppb O_3	40%	19%	
90ppb SO_2	-*	200ppb O_3	45%	20%	
109ppb SO_2	40%	250ppb O_3	33%	17%	

*starke Schimmelbildung

Aus Tab. 33 ist ersichtlich, daß niedrige Dosen von SO_2 (bis 54ppb), und O_3 (bis 100ppb) fördernd auf das Pollenschlauchwachstum wirken. Auch WHITMORE et al. (1982a,b) beschreiben eine stimulierende SO_2 -Wirkung bei 60ppb auf die Pollenkeimung verschiedener Holzarten.

Außer der direkten Wirkung des SO_2 , und des Ozons auf den Zellmetabolismus, muß als Ursache für die Förderung des Pollenschlauchwachstums der Einfluß der Schadgase auf die unvermeidliche Kontamination vornehmlich durch Penicilliumarten in Betracht gezogen werden.

Stoffwechselprodukte dieser Pilze beeinflussen mit großer Wahrscheinlichkeit das Wachstum der Pollenschläuche. Eine fungizide Wirkung, wie sie bei HIBBEN (1975), ELSTNER (1984) und WEIDENSAUL et al. (1979) für SO_2 beschrieben

ist, könnte die Förderung der PSL gegenüber der unbegasteten Kontrolle erklären. Allerdings wurde bei dem parallel hierzu laufenden Versuch, der der Überprüfung des Mycelwachstums verschiedener pathogener Pilze diente, keine Hemmung der Kontamination durch SO_2 oder O_3 auf den Nährplatten beobachtet (DOTZLER, mündliche Mitteilung).

Als zweiter Faktor, der sich sekundär durch die SO_2 -Begasung verändert, muß der pH-Wert der Saccharosenährplatte betrachtet werden. Generell ist eine Absenkung des pH-Werts durch SO_2 -Absorption möglich und für hohe Konzentrationen beschrieben (KARNOSKY & STAIRS 1974). Jedoch ergab eine nach der Begasung durchgeführte Infrarotspektrometrie der Agarplatten keine Anreicherung von Schwefel innerhalb der Nachweisgrenzen (SCHOLZ persönl. Mitteilung), so daß diese Möglichkeit ausgeschlossen werden kann.

Somit scheint SO_2 , wie auch O_3 eine dosisabhängige Förderung auf das Pollenschlauchwachstum von Fichtenpollen auszuüben.

Konzentrationen von 36ppb SO_2 + 50ppb O_3 , die einzeln appliziert das Längenwachstum des Keimschlauchs fördern, rufen eine Hemmung der PSL hervor, wenn sie kombiniert auf die Pollenkeimung einwirken. Ein synergistischer Effekt tritt auch bei höheren Dosen auf (Tab.33, Spalte 3).

Ab einem bestimmtem Schwellenwert, der in diesem Experiment für SO_2 zwischen 60 und 70ppb und für O_3 zwischen 100 und 150ppb liegt, wirken beide Gase einzeln und unabhängig voneinander hemmend auf das Wachstum von Fichtenpollen (Tab. 33).

3.2.3.2 SO₂

Aufbauend auf diesen Voruntersuchungen wurden 1987 an der unter Abschnitt 2.3.3.1 beschriebenen Apparatur Begasungen mit SO₂ an einem umfangreicheren Untersuchungsmaterial mit Pollen mehrerer Baumarten, Herkünfte und Individuen durchgeführt.

Fichte

SO₂-Begasung von Fichtenpollen (Fi 4) führte bei einer Dosis von 100ppb zur Förderung (Tab. 34), bei 150ppb zur Hemmung des Pollenschlauchwachstums gegenüber der Kontrolle (Tab. 35). Die Hemmung war bei der Keimung auf Wasseragar deutlicher ausgeprägt als bei der Keimung auf Saccharosenährböden (Tab. 35). Im Gegensatz zu den Beobachtungen von FRÖHLICH (1964) konnte auf Saccharoseagar keine bessere Keimung der Fichtenpollen festgestellt werden als auf Wasseragar (Tab. 35).

Pollen verschiedener Herkünfte (Oderhaus 4 und Mandelbeck 1) zeigte keine Unterschiede in der PSL auf Begasung mit 150ppb SO₂ während der Keimdauer. Bei beiden Pollenproben trat bei dieser Dosis eine etwa gleich starke Verkürzung der mittlere PSL ein (Tab. 36).

TABELLE 34 Mittlere PSL von Fi 4 nach 48h Begasung mit 100ppb SO₂ während der Pollenkeimung

Behandlung	PSL in µm
Kontrolle	214µm
100ppb SO ₂	275µm

TABELLE 35 Mittlere PSL von Fi 4 nach 48h Begasung mit 150ppb SO₂ während der Pollenkeimung auf zwei Nährmedien

Behandlung	Wasseragar	Saccharoseagar
Kontrolle	187µm	158µm
150ppb SO ₂	149µm	145µm

TABELLE 36 Mittlere PSL von Fichtenpollen zweier Herkünfte (Fi 1 und Fi 4) nach 48h Begasung mit 150ppb SO₂ während der Keimung

Herkunft Behandlung	Oderhaus Fi 1	Mandelbeck Fi 4
Kontrolle	102µm	108µm
150ppb SO ₂	96µm	98µm

Weiterhin wurden Pollen zweier Baumpaare, die unterschiedlich stark durch Waldsterben geschädigt waren, während der 48stündigen Keimphase mit 150ppb SO₂ begast. Dadurch sollte festgestellt werden, ob sich Pollen gesunder und geschädigter Individuen in der SO₂-Sensibilität unterscheiden.

Wie Tab. 37 zeigt, reagierten Pollen von Fichten mit weniger als 25% Nadelverlust, im folgenden als "gesund" bezeichnet, nicht anders auf SO₂-Begasung wie Pollen von Fichten mit mehr als 50% Nadelverlust, im folgenden als "krank" bezeichnet. Bei den untersuchten Pollenproben aus Sauerlach blieb das Keimprozent durch Begasung mit 150ppb SO₂ weitgehend unbeeinflusst, während die mittlere Pollenschlauchlänge unabhängig vom Benadelungszustand des Spenderbaumes um 5-15% zunahm.

TABELLE 37 Pollen von Fichten mit unterschiedl. Schadensgrad. Mittlere PSL und Keimprozent nach 48h Begasung mit 150ppb SO₂ während der Keimung

Baumpaar	Baumnr.	Entnadelungs- prozent	PSL in µm		Keimprozent	
			SO ₂	Kontr.	SO ₂	Kontr.
I	701	20% (gesund)	83µm	77µm	38%	39%
I	323	70% (krank)	96µm	86µm	17%	19%
II	006	10% (gesund)	74µm	64µm	20%	20%
II	314	75% (krank)	79µm	76µm	52%	51%

Kiefer

Kiefernpollen, der, anders als Fichtenpollen, 96h exponiert worden war, reagiert schon auf 100ppb SO₂ mit Verkürzung der Pollenschlauchlängen. (Tab. 38). Die begasten Pollen erreichten sowohl bei Keimung auf Wasseragar, wie bei Keimung auf Saccharosenährplatten 77% des Kontrollwertes (Tab. 39).

Allerdings gibt es individuelle Unterschiede in der Reaktion auf die SO₂-Begasung: Pollen der Kiefer 40 (Herkunft Ostpreußen) reagiert im Gegensatz zum Pollen der Kiefer 46 (ebenfalls Herkunft Ostpreußen) mit einem verstärkten Wachstum der Pollenschläuche auf die Begasung mit 100ppb SO₂, während Pollen der Kiefer 11 (Herkunft Stetzfeld) bei gleicher Dosis keine Reaktion zeigte (Tab. 40).

TABELLE 38 Mittlere PSL von Kie 46 nach 96h Begasung mit 100ppb SO₂ während der Pollenkeimung

Behandlung	PSL in µm
Kontrolle	62µm
100ppb SO ₂	55µm

TABELLE 39 Mittlere PSL von Kie 46 nach 96h Begasung mit 100ppb SO₂ während der Pollenkeimung auf zwei Nährmedien

Nährmedium	Agar mit 15% Saccharose	Wasseragar
Behandlung		
Kontrolle	66µm	61µm
100ppb SO ₂	51µm	47µm

TABELLE 40 Mittlere PSL der Kie 46, Kie 40, und Kie 11
nach 96h Begasung mit 100ppb SO₂ während der
Pollenkeimung

Pollenprobe	mittlere PSL in µm	
	SO ₂	Kontrolle
Kie 40	63µm	57µm
Kie 46	51µm	66µm
Kie 11	40µm	40µm

Auch KELLER & BEDA (1984) beschreiben eine hohe SO₂-
Empfindlichkeit von Pinus sylvestris Pollen, der bei
einer Dosis von 75ppb über 24h einen Rückgang des Keim-
prozents von 50% auf 2% erlitt.

Tanne

Abies gilt als SO_2 -empfindliche Baumgattung. Im folgenden Versuch wird die SO_2 Empfindlichkeit zweier *Abies*arten und eines Artbastards geprüft. Jeweils 4 Petrischalen mit keimenden Pollen wurden mit 150ppb begast. Der Pollen des Artbastards auch mit 125ppb. Nach 48h wurden die Keimschläuche gemessen. Pollen von *Abies concolor* und *Abies pinsapo* reagierten auf Begasung mit 150ppb mit erheblichem Rückgang der Pollenschlauchlängen. Die Schädigung dieser Pollen war deutlich stärker als die des Hybrids. Die PSL von *Abies concolor* x *grandis* war schon bei 125ppb im gleichem Ausmaß wie bei einer Dosis von 150ppb reduziert (Tab. 41). Damit unterscheidet sich die SO_2 -Empfindlichkeit dieser *Abies*-Pollen kaum von der Sensibilität von Kiefernpollen. KELLER und BEDA (1984) fanden jedoch eine höhere SO_2 Toleranz bei Pollen von *Abies alba* als bei *Pinus sylvestris* Pollen.

TABELLE 41 Mittlere PSL von drei *Abies*arten nach 48h Keimung unter SO_2 -Begasung mit 125ppb oder 150ppb

Abies-Art	PSL in μm unter Einfluß von			
	150ppb SO_2	Kontrolle	125ppb SO_2	Kontrolle
A. concolor	132 μm	210 μm	-	-
A. pinsapo	86 μm	180 μm	-	-
A. concolorx grandis	142 μm	170 μm	154 μm	184 μm

Unterschiede in der SO_2 -Sensibilität zwischen Pollen von von Pinus, Cedrus, Abies und Picea-Arten

Pollen von *Pinus sylvestris* wird schon ab einer Dosis von 100ppb in der Ausbildung des Pollenschlauchs behindert, *Abies concolor* und *Abies pinsapo* bei 150ppb, der, unter den getesteten *Abies*-Arten relativ SO_2 -tolerante Artbastard *Abies concolor* x *grandis* auch bereits bei 125ppb, *Picea abies* ab 150-200ppb, eine Dosis, bei der *Cedrus atlantica*-Pollen noch keine Beeinträchtigung des Pollenschlauchwachstums zeigte.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß die Höhe der Dosis, die eine Förderung oder Hemmung des Pollenschlauchwachstums bewirkt, nicht nur stark artabhängig und individuell verschieden ist, sondern desweiteren auch von den relativ frei wählbaren Versuchsbedingungen abhängt. Dies gilt nicht nur, wie in diesem Abschnitt ausgeführt, für das verwendete Keimmedium, sondern auch für andere Faktoren, die die Pollenkeimung beeinflussen. So wurde im Vorversuch 1986 für die Keimhemmung von Fichtenpollen ein Schwellenwert von ca. 60ppb SO_2 ermittelt. 1987, bei einer mit anderer Apparatur durchgeführten Begasung, lag dieser Schwellenwert bei 150ppb für die Fichte. Dieser große Unterschied ist nicht allein durch die individuelle Reaktion der getesteten Pollen erklärbar. Vielmehr müssen auch unterschiedliche Versuchsbedingungen, wie höhere Luftfeuchtigkeit 1987 gegenüber dem Versuchsaufbau 1986 in Betracht gezogen werden. Eventuell kommen andere, weniger offensichtliche, aber versuchsbedingte Einflüsse hinzu. 1987 konnte die tatsächliche SO_2 -Dosis in den Expositionskammern nicht überprüft werden, es ist nur die zugeführte SO_2 -Konzentration bekannt. Die bei diesem Versuchsaufbau höher liegenden Schwellenwerte weisen darauf hin, daß ein Teil des SO_2 sich an den Wänden der Zuluftschläuche ablagerte, bevor es den Begasungsexsikkator erreichte.

Berücksichtigt man die Vielzahl der Faktoren, die die Schadwirkung von SO_2 -Gas modifizieren, muß bezweifelt werden, daß die in vitro gewonnenen Grenzwerte auf in vivo Bedingungen übertragbar sind.

3.2.3.3 O₃ und NO₂

Bei diesen Versuchen konnte im Gegensatz zu den Vorjahresversuchen mit SO₂ und/oder O₃, die Kontrolle nicht parallel begast werden. Die Schadstoff- und die Reinluftbegasung mußten nacheinander, wie in Tab. 4 (Vgl. Abschn. 2.3.3.2) dargestellt, in mehrtägigen Abständen durchgeführt werden. Zur Relativierung der zeitlich voneinander getrennten Behandlungen wurde zu Proben in die Expositionskammer ein luftdicht verschlossener Exsikkator mit einer 3molaren NaCl Lösung als Standardprobe beigelegt, der Parallelproben enthielt. Verglichen wurden die Relationen der mittleren Keimschlauchlänge zwischen den frei in der Kammer exponierten Proben und denen im Exsikkator:

$$\frac{\text{PSL xppb}}{\text{PSL Exsikk.x}} \cdot \frac{\text{PSL Reinluft}}{\text{PSL Exsikk. Reinluft}} \cdot 100\%$$

PSL xppb stellt die mittlere Pollenschlauchlänge der offen begasten Pollen dar, PSL Exsikk.x, die der zeitgleich im Exsikkator gekeimten Pollen. PSL Reinluft bezeichnet die mittlere Pollenschlauchlänge unter Kontrollbegasung und PSL Exsikk. Reinluft die während der Kontrollbegasung im beigelegten Exsikkator entstandene mittlere Pollenschlauchlänge.

Beispielsweise keimte der Pollen von *Cedrus atlantica* in der Reinluftbegasung vom 24.4-27.4 zu einer mittleren PSL von 144µm aus, im beigelegtem Exsikkator von 156µm. Durch die Begasung mit 25ppb O₃ betrug die mittlere PSL 128µm, die PSL im Exsikkator 163µm. Nach obiger Formel relativiert betrug die PSL der begasten Pollen 85% der Kontrolle.

Drei zu verschiedenen Terminen durchgeführte Reinluftbegasungen, führten zu unterschiedlichen Ergebnissen. Die Werte der Standardproben schwankten ebenfalls stark. Die Ursachen dafür sind nicht bekannt; möglicherweise liegen sie in unterschiedlichen Transportbedingungen (Außentemperatur während der 30minütigen Fahrt) der

gekeimten Proben von der GSF zum Ort der Auswertung, in der Alterung der Pollen oder in verschiedenen starker Kontamination mit *Penicillium spec.*

Dadurch konnte das ursprüngliche Versuchsziel, die Ermittlung von Schwellenwerten, ober- oder unterhalb derer eine Hemmung bzw. eine Förderung der Pollenkeimung einsetzt, nicht mehr verfolgt werden. Obwohl diese methodischen Schwierigkeiten nicht mehr behoben werden konnten, sind die nach oben beschriebener Formel hergeleiteten Prozentsätze für alle weiteren Baumarten und Begasungskonzentrationen in Tab. 42 angegeben. Als Bezugsgröße wurde der Mittelwert der drei Reinluft-begasungen zugrunde gelegt. ,

TABELLE 42 Rel. PSL von vier Koniferen-Arten nach O₃ und NO₂-Begasung während der Keimung (Kontrolle=100%); (N₁=4); Fi: *Picea abies*, Kie: *Pinus sylvestris*, Ze: *Cedrus atlantica*, Ta: *Abies concolor*

Schadstoff-Konzentration	Baumart			
	Fi	Kie	Ze	Ta
25ppb O ₃	134%	102%	89%	98%
50-75ppb O ₃	100%	106%	110%	90%
50-75ppb O ₃	76%	-*	50%	105%
50-80ppb O ₃	67%	-*	-*	75%
100ppb NO ₂	-*	112%	116%	117%
150ppb NO ₂	-*	107%	103%	101%
175ppb NO ₂	87%	82%	106%	92%
200ppb NO ₂	89%	80%	81%	70%
250ppb NO ₂	102%	89%	105%	96%

-* Verworfen aufgrund von starker Kontamination durch Mikroorganismen

Dabei lassen sich folgende Feststellungen treffen:

1. Wie beim Vorversuch wird die Keimung von Fichtenpollen durch niedrige O_3 -Dosen (25ppb) gefördert, durch hohe ($> 50ppb$) gehemmt.

Bei Tanne, Zeder und Fichte trat bei der Begasung mit 50-80ppb O_3 eine deutliche Hemmung der PSL ein. Die Keimung von *Abies concolor* Pollen reagierte am unsensibelsten auf O_3 -Begasung, Pollen von *Cedrus atlantica* am empfindlichsten.

2. Die NO_2 -Werte lassen vermuten, daß der Einfluß dieses Schadstoffs auf die Pollenkeimung, wie bei SO_2 (s. Abschn. 3.2.3.2) und O_3 (s. Abschn. 3.2.3.1) dosisabhängig ist. Bei 100ppb keimten die begasten Pollen besser als die Kontrollproben. Eine deutliche Hemmung des Pollenschlauchwachstums war erst ab einer Dosis von 200ppb NO_2 feststellbar. Aus dieser Tendenz fällt die Begasung mit 250ppb NO_2 für alle getesteten Baumarten heraus. Dazu ist zu bemerken, daß die Standardproben im beigestellten Exsikkator schlechter keimten als in den Versuchen davor und dadurch die Bezugsgröße verzerrt ist. Welche Keimbedingungen sich im Kontrollexsikkator geändert hatten ist unbekannt, Zusammenhänge mit der Kontamination durch Mikroorganismen sind zu vermuten.

Gegenüber NO_2 reagierte Fichten- und Kiefernpollen am sensibelsten, der geringste Einfluß war bei Pollenkeimung von *Cedrus atlantica* zu verzeichnen.

Faßt man die Ergebnisse der beschriebenen Begasungsexperimente zusammen, so zeigt sich eine generelle Beeinflussung der Pollenkeimung *in vitro* durch Luftverunreinigungen. Sowohl die Stimulation, wie auch die Hemmung des Pollenschlauchwachstums hängt ab von der Konzentration und Art der Verunreinigung, der Expositionsdauer, der rel. Luftfeuchtigkeit, sowie anderen, nicht näher bestimmten Faktoren. Dabei treten im Experiment Schäden an der Pollenkeimung teilweise bei Konzentrationen auf, wie sie in der Atmosphäre nachgewiesen werden. So bewirken 36ppb SO₂ zusammen mit 50ppb O₃ eine Verkürzung der mittleren Pollenschlauchlänge von Fichte um 10%.

3.2.3.4 Autoabgase und NO_x

Mit Abgasen eines Ottomotors sowie mit einer entsprechend hohen NO_x Dosis wurden Fichten- und Kiefernpollen, Fichtensamen und Sporen von *Polytrichum attenuatum* begast. Der NO_x-Gehalt der Autoabgase entwickelte sich während der 25-minütigen Begasung wie in der Tab. 43 gezeigt und betrug im Durchschnitt 650ppm NO_x, davon 570ppm NO und 80ppm NO₂. Nach zehn Minuten Begasungsdauer wurde ein CO Vol% von 0,37%, nach 20 Minuten von 0,39% gemessen. Durch die starke Abkühlung in der Kupferspirale fiel ein Teil der phytotoxischen Fraktionen, namentlich aliphatische Kohlenwasserstoffe, Nitroalkane, Aldehyde und Aromate aus (Kondensat). Sie wurden in einem gesonderten Versuch in ihrer Wirkung auf die Pollenkeimung überprüft (vgl. Abschn. 3.2.1).

TABELLE 43 Entwicklung des NO_x-Gehalts (ppm) im Autoabgas während der 25-minütigen Versuchsbelegung

Min.	NO _x	NO	NO ₂	NO:NO ₂
in ppm				
1.	515	470	45	10:1
2.	570	518	52	10:1
3.	610	565	45	13:1
4.	640	568	72	8:1
6.	655	570	85	7:1
8.	655	570	85	7:1
10.	660	580	80	7:1
12.	665	580	85	7:1
14.	680	590	90	7:1
16.	670	585	85	7:1
18.	680	590	90	7:1
20.	690	605	85	7:1
22.	700	610	90	7:1
24.	700	610	90	7:1
25.	715	620	95	7:1

Tab. 43 zeigt die Entwicklung des NO_x -Gehalts während der 25-minütigen Begasung. Die NO_x -Emission steigt mit zunehmender Laufdauer des Motors an, dabei ändert sich das $\text{NO}:\text{NO}_2$ Verhältnis zugunsten von NO_2 . Nach 6Min. Laufdauer sinkt die Relation und pendelt sich auf 7:1 ein.

Quantitativ betrachtet ist NO_x der Hauptanteil der phytotoxischen Fraktion der Autoabgase. Ob dieser Anteil auch die Hauptursache für Schäden an der Keimphase von Pollen sind, sollte überprüft werden, indem Vergleichsproben 650ppm NO_x ausgesetzt wurden. Diese Dosis entsprach der durchschnittlichen Konzentration im Autoabgas während der Versuchs-begasung (Tab. 43). Sie ist so hoch, daß die Pollenkeimung, die als besonders sensibler Prozeß beschrieben wird (FEDER 1968; COX 1985a), möglicherweise zu stark beeinträchtigt wird, um einen Effekt, der alleine auf der NO_x -Fraktion beruht von anderen Ursachen zu trennen. Aus diesem Grund wurden weitere Objekte, nämlich Moossporen und Samen von Fichte im gleichen Versuchsansatz begast.

Pollen (*Picea abies*, *Pinus sylvestris*)

Eine 25-minütige Begasung mit Autoabgasen bewirkte den völligen Keimverlust der Fichten- und Kiefernpollen. Auch unter dem Einfluß von 650ppm NO_x alleine keimten die Pollen nicht. Als Schwellenwert, bei dem dieser Pollen nach 25-minütiger Begasung noch keimt, wurde 290ppm NO_x ermittelt, dabei keimte die begaste Variante zu 21% im Vergleich zu 35% der unbegasten Kontrolle. Die PSL lag mit ca. 20µm unter den Werten, die meßtechnisch erfaßt werden konnten (s. Tab. 44).

Tab. 44 zeigt den Rückgang der PSL in Abhängigkeit von der Expositionsdauer bei 290ppm NO_x.

TABELLE 44 Mittlere PSL ($\bar{x}$) von Fichtenpollen in Abhängigkeit von der Begasungsdauer mit 290ppm NO_x

Begasungs- dauer	Pollenschlauchlänge in µm			
	$\bar{x}$	sd ₁	$\bar{x}$	sd ₁
	Versuch 1		Versuch 2	
Kontrolle	115µm	9	129µm	23
1Min	100µm	7	128µm	4
5Min	92µm	7	114µm	5
10Min	83µm	5	96µm	4
25Min	20µm*	nicht ermittelt		

* Geschätzte PSL, da unterhalb der technisch meßbaren Länge

Werden Fichtenpollen mit der gleichen Gesamtdosis, eine Probe jedoch fünf Minuten mit 290ppm NO_x, die andere zehn Minuten mit 145ppm NO_x begast, ergibt sich kein Unterschied in der mittleren Pollenschlauchlänge (Tab. 45). Offensichtlich scheint die zugeführte Gesamtdosis des Schadgases und nicht die Expositionsdauer entscheidend für das Pollenschlauchwachstum zu sein.

Anders dagegen bei Kiefernpollen. Hier nimmt die PSL mit zunehmender Begasungsdauer kontinuierlich ab. Trotz gleicher Gesamtdosis unterschied sich die PSL der Behandlungsvariante 5Min mit 290ppm NO_x von der Variante 10Min mit 145ppm. Die Erhöhung der Dosis von 145ppm auf 290ppm erbrachte bei einer Expositionsdauer von 10Min. keine weitere Verkürzung der PSL.

Bei Kiefer überwiegt in diesem Dosisbereich der Einfluß der Expositionsdauer (Tab. 46).

TABELLE 45 Mittlere PSL ($\bar{x}$) von Fichtenpollen bei gleicher Gesamtdosis, aber unterschiedlicher Begasungsdauer und NO_x-Konzentration

Behandlung		Pollenschlauchlänge in μm			
Dauer	NO _x - Konz.	$\bar{x}$	sd ₁	$\bar{x}$	sd ₁
		Versuch 1		Versuch 2	
5Min	290ppm	112 μm	5	114 μm	4
10Min	145ppm	110 μm	4	116 μm	5
10Min	290ppm	100 μm	8	96 μm	6

TABELLE 46 Mittlere PSL ($\bar{x}$) von Kiefernpollen in Abhängigkeit von Begasungsdauer und NO_x-Konzentration

Behandlung		Pollenschlauchlänge in μm	
Dauer	NO _x - Konz.	$\bar{x}$	sd ₁
Kontrolle		49	5
1Min	290ppm	42	11
5Min	290ppm	36	9
10Min	290ppm	29	3
10Min	145ppm	28	6

Sporen (*Polytrichum attenuatum*)

Auch Moossporen, die während der Keimung für 25Min. Autoabgasen ausgesetzt waren, büßten ihre Keimfähigkeit völlig ein. Wurden sie dagegen nur der NO_x -Fraktion von 650ppm ausgesetzt, erhöhte sich die durchschnittliche Protonemalänge gegenüber der Kontrolle (Tab. 47). Dies läßt den Schluß zu, daß andere Substanzen der Autoabgase den Keimverlust bewirken.

Diese Stoffe beeinträchtigen allerdings nur die keimenden Sporen. Wurden die Sporen trocken begast und erst danach zum Keimen angesetzt, keimten sie zu gleicher Länge wie die Kontrollsporen (Tab. 48)

TABELLE 47 Durchschnittliche Protonemalänge ($\bar{x}$) von *Polytrichum attenuatum* in μm nach 25Min Begasung mit 650ppm NO_x am 2. Keimtag

	$\bar{x}$	sd _r	N _r	Sig.
Kontrolle	137 μm	69	400	***
NO_x	161 μm	90	400	

TABELLE 48 Durchschnittliche Protonemalänge ($\bar{x}$) von *Polytrichum attenuatum* in μm nach 25Min Begasung der trockenen Sporen mit Autoabgasen (anschließende Keimzeit: 10Tage)

	$\bar{x}$	sd _r	N _r	Sig.
Kontrolle	176 μm	72	200	n.s.
Autoabgase	170 μm	73	235	

Samen (*Picea abies*)

Von allen exponierten Objekten blieb nur Samen unter dem Einfluß einer 25Min. dauernden Exposition gegen Motorabgase keimfähig. Sein Keimprozent und die Länge der Primärwurzel ist in Tab. 49 dargestellt. Das Keimprozent blieb gegenüber der Kontrolle unverändert.

TABELLE 49 Keimung und Länge der Radicula von Fichtensamen nach 7 Tagen (Exposition: 25 Min. am 2. Keimtag: Autoabgasen bzw. 650ppm NO_x)

Behandlung	Keimprozent		Radiculalänge in mm			
	$\bar{x}$	sd ₁	$\bar{x}$	sd ₀	N	Sig.
Kontrolle	90	3	36	25	324	***
Autoabgase	92%	2	30	23	397	
Kontrolle	90	5	27	12	100	n.s.
650ppm NO _x	91	3	28	12	143	

Autoabgase hemmten das Wachstum der Primärwurzel, eine entsprechende Dosis NO_x dagegen nicht. Auch beim Fichtensamen sind es offensichtlich andere Fraktionen der Autoabgase, die das verminderte Wachstum der Keimwurzel hervorrufen.

Abschließend läßt sich festhalten, daß die Toleranz von Polytrichumsporen und Fichtensamen gegenüber NO_x weitaus höher war, als gegenüber Autoabgasen mit dem gleichem NO_x-Anteil. Auf die Protonemalänge von Polytrichum attenuatum wirkt eine 25minütige hochdosierte NO_x-Begasung sogar fördernd. Auch bei Pollen von Fichten und Kiefern besteht eine gewisse Toleranz gegenüber sehr hohen, in der Luft nicht gemessenen, Dosen an NO_x, sofern diese nur kurzfristig (1Min.) einwirkten. Insgesamt beruht die toxische Wirkung der Autoabgase offensichtlich mehr auf anderen Fraktionen als auf ihrem NO_x-Anteil.

3.3 Wirkung von SO₂-behandeltem Pollen auf den Befruchtungserfolg

3.3.1 Keimung trocken begasten Pollens

3.3.1.1 *Picea abies* im Vorversuch

Wird keimender Fichtenpollen mit 150ppb SO₂ begast, reduziert sich seine Pollenschlauchlänge gegenüber unbegasten Pollen um 10% (vgl. 3.2.3.2).

Um jene SO₂-Dosis zu ermitteln, die eine entsprechende Schädigung von trockenem Pollen hervorruft, wurde in einem Vorversuch Pollen von *Picea abies* mit jeweils 600µg/m³ SO₂ drei, fünf und sieben Tage bzw. mit 800µg/m³ SO₂ vier Tage lang begast. Die PSL und das Keimprozent für die Variante mit 600µg/m³ wurde im anschließenden Keimversuch ermittelt (Tab. 51). Die Begasung mit 800µg/m³ führte zu den in Tab. 53 dargestellten Keimprozenten.

TABELLE 51 Mittlere PSL (N_p=200) und Keimprozent (N_p=400) von *Picea abies* Pollen nach 3-, 5-, und 7-tägiger Begasung (Expo) des trockenen Pollens mit 600µg/m³ SO₂

Expo in Tagen	Behand- lung	Keimprozent			PSL in µm			PSL-K%
		X	sd _i	Sig	X	sd _p	Sig	
3	Kontr.	54%	5,2		206	61		111µm%
3	SO ₂	50%	4,8	n.s.	189	65	***	95µm%
5	Kontr.	40%	2,1		188	60		75µm%
5	SO ₂	41%	4,7	n.s.	182	62	n.s.	75µm%
7	Kontr.	26%	6,4		178	69		46µm%
7	SO ₂	33%	6,6	**	163	61	**	54µm%

Drückt man diese Werte stets in Prozent zur jeweiligen Kontrolle aus, so ergibt sich mit zunehmender Expositionsdauer ein höheres Keimprozent für die mit $600\mu\text{g}/\text{m}^3$ SO_2 begasten als für die unbegasten Proben. Bei allen vier Versuchsvarianten war dagegen eine deutliche Reduktion der mittleren PSL SO_2 -behandelter Pollen gegenüber der Kontrolle zu beobachten. Die Pollenvitalität, ausgedrückt in $\text{K}\%$ ·PSL, ist bei der drei Tage SO_2 -exponierten Probe im Vergleich zur Kontrolle vermindert, bei längerer Exposition dagegen erhöht. (Tab. 52).

Unter $800\mu\text{g}/\text{m}^3$ SO_2 ist auch das Keimprozent gegenüber der Kontrolle signifikant vermindert (vgl. Tab. 53).

TABELLE 52 Mittlere PSL und Keimprozent ($\text{K}\%$) von trocken exponiertem Fichtenpollen in Prozent der jeweiligen Kontrolle. (Konz.=Konzentration; Dauer=Expositionsdauer; Kontrolle=100%)

Konz.	Dauer	Keim%	PSL	PSL·K%
$600\mu\text{g}/\text{m}^3$	3 Tage	92,5%	92%	86%
	5 Tage	102,5%	97%	100%
	7 Tage	126,5%	92%	117%
$800\mu\text{g}/\text{m}^3$	4 Tage	52,2%	87%	46%

TABELLE 53 Mittlere PSL und Keim% von *Picea abies* Pollen nach Begasung mit $800\mu\text{g}/\text{m}^3$ SO_2 (Dauer: 4 Tage)

Behandlung	Keimprozent			PSL in μm			PSL·K%
	$\bar{x}$	sd ₁	Sig.	$\bar{x}$	sd ₂	Sig.	
Kontrolle	67%	3,9		170	62		114
$800\mu\text{g}/\text{m}^3$ SO_2	35%	2,2	***	148	61	***	52

Aufgrund dieser Ergebnisse wurde entschieden, den Pollen von *Picea omorika* für den Bestäubungsversuch mit ca. $800\mu\text{g}/\text{m}^3$ SO_2 über einen Zeitraum von 3, 4 und 5 Tagen zu begasen, um eine Vorschädigung des Pollens durch SO_2 , bei möglichst kurzer Expositionszeit zu erreichen.

Dadurch sollten Effekte, die unabhängig vom SO_2 -Einfluß auftreten, gering gehalten werden. Wie die Ergebnisse des Vorversuchs zeigen, nehmen sowohl das Keimprozent wie die PSL unabhängig von der Behandlung mit steigender Expositionsdauer ab. Zeitweise überlagern expositionsbedingte Einflüsse den SO_2 -Effekt. So überwiegen bei fünftägiger Begasung mit $600\mu\text{g}/\text{m}^3$ SO_2 nicht SO_2 -gebundene Einflüsse: die mittlere PSL von Kontrolle und Begasung unterscheidet sich nicht signifikant. Die drei und sieben Tage lang begasten Proben dagegen zeigen einen signifikanten Rückgang der PSL um die gewünschten 10%.

Durch eine Begasung mit nur $600\mu\text{g}/\text{m}^3$ SO_2 ging das Keimprozent nicht zurück, im Gegenteil: Pollen der begasten Variante keimte zu einem höherem Prozentsatz als die Kontrolle. Erst bei einer Dosis von $800\mu\text{g}/\text{m}^3$ SO_2 (4Tage) sank auch das Keimprozent der begasten Probe.

3.3.1.2 *Picea omorika*

Für den Hauptversuch wurden Pollen von *Picea omorika* mit $820\mu\text{g}/\text{m}^3$ SO_2 begast. Eine Charge war diesen Bedingungen 3 Tage ausgesetzt (P3), eine andere 4 Tage (P4) und eine weitere 5 Tage (P5). Der Kontrollpollen K4 wurde 4 Tage ohne SO_2 unter sonst analogen Bedingungen gehalten.

Das Keimungsverhalten unmittelbar im Anschluß an die Begasung ist in Tab. 54 zusammengestellt.

TABELLE 54 Keimungsverhalten von *Picea omorika* Pollen nach unterschiedlich langer Begasung mit $820\mu\text{g}/\text{m}^3$ SO_2 des trockenen Pollens. Signifikanz (Sig.) gegenüber der Kontrolle K4

Pollen-charge	Keimprozent			Pollenschlauchlänge in μm		
	$\bar{x}$	sd_1	Sig	$\bar{x}$	sd_1	Sig.
P3	73%	3,7	n.s.	102	33	n.s.
P4	71%	4,6	n.s.	97	36	n.s.
P5	73%	2,2	n.s.	89	33	**
K4	72%	4,1		98	33	

Picea omorika Pollen war gegenüber SO_2 -Begasung widerstandsfähiger als *Picea abies* Pollen. Auf die Bedingungen in den Begasungsküvetten reagierte er empfindlich: Die nur drei Tage lang exponierte Probe P3 blieb am vitalsten, der vier Tage lang begaste Pollen wuchs wie der gleich lang exponierte Kontrollpollen im Mittel zu $97\mu\text{m}$ bzw. $98\mu\text{m}$ langen Pollenschläuchen aus. Nur die mittlere PSL der Probe P5 war um 10% gegenüber den anderen Proben signifikant verkürzt.

3.3.2 Befruchtungserfolg unterschiedlich SO_2 -begasten Pollens

Die Empfängnisbereitschaft (Fängigkeit) der Samenanlagen von Fichten entwickelt sich sukzessive und beträgt wenige Stunden bis einen Tag (WEBER, mündliche Mitteilung). Um eine möglichst große Anzahl von fängigen Samenanlagen zu erreichen, wurden die weiblichen Blüten an zwei aufeinanderfolgenden Tagen bestäubt.

Trotzdem war an den Tagen, an denen die Bestäubung erfolgte nur ein Teil der Samenanlagen fängig. Die tatsächliche Zahl der empfängnisbereiten Samenanlagen zum Zeitpunkt der Bestäubung ist nicht bekannt, daher kann eine Beeinträchtigung des Befruchtungserfolgs durch die SO_2 -Begasung des Pollens nicht direkt ermittelt, sondern nur, wie in diesem Abschnitt ausgeführt, aufgrund mehrerer Indizien, abgeleitet werden. Als Beurteilungsgrößen wurde herangezogen:

1. Der Anteil der mit bloßem Auge erkennbare Hohlkörner (s. Abschn. 2.4.4)
2. Samenzahl pro entwickeltem Zapfen.
3. Hohlkornanteil der geröntgten, äußerlich als Vollkorn angesprochenen Samen.
4. Tausendkorngewicht der reinen, von Hohlkörnern befreiten Samen.

Alle diese Größen hängen nicht nur von der Pollenvitalität ab. Neben der Fängigkeit der Samenanlage und ihrer Funktionstüchtigkeit, spielen Umwelteinflüssen eine Rolle, die auf die Samenentwicklung einwirken können. Dementsprechend schwanken die Werte von Zapfen zu Zapfen wie auch zwischen den einzelnen Bestäubungstüten stark. Der Hohlkornanteil variiert zwischen 0-100% und die Samenzahl pro Zapfen bewegt sich zwischen 0 und 200. Als Einzelwerte geben diese Parameter daher wenig Auskunft über Beeinträchtigungen des Befruchtungserfolgs, die allein auf Funktionsstörungen des Pollens zurückzuführen sind.

Erst aufgrund des Stichprobenumfangs und der sorgfältigen Stichprobenauswahl lassen sich Aussagen über den Einfluß der Pollenvitalität ableiten, denn es kann davon ausgegangen werden, daß sich die anderen Einflüsse unabhängig von der Pollenvitalität und damit ungerichtet auswirken. Versuchsbedingte Beeinflussungen trafen für die Kontrolle wie für alle Behandlungen im gleichen Maße zu, daher ist die Vergleichbarkeit der Bestäubungsvarianten untereinander gewährleistet, auch wenn sie mit frei abgeblühten Zapfen nicht vergleichbar sind.

Alle ermittelten Werte sind baumweise zusammengefaßt und nach Pollenbehandlungen getrennt in Tab. 55 aufgelistet.

TABELLE 55 Bestäubungsversuch (1987) an *Picea omorika* mit unterschiedlich vorbehandeltem Pollen Samen-zahl pro Zapfen (Spalte 5), Tausendkorngewicht (TKG), und Hohlkornanteil (Hohl%) (Spalte 4, 6, 7)

1	2	3			4	5			6	7	8	
POLLEN	ZAPFEN-	SAMEN			HOHL	SAMEN/ZAPFEN			RONTGEN	SUM	TKG	
CHARGE	ZAHL	voll	hohl	ges.	%	gesamt	voll	%	Hohl%	Hohl%	$\bar{x}$	sd
						abs.	abs.					
BAUM 1												
K4	24	578	83	661	13%	28 100%	24 100%		14%	25%	3,4	0,2
P3	11	200	24	224	11%	20 72%	18 76%		27%	35%	2,8	0,4
P4	15	129	16	145	11%	10 36%	9 38%		27%	42%	2,8	0,4
P5	25	230	88	318	28%	13 46%	9 38%		35%	53%	2,7	0,4
BAUM 2												
K4	3	125	25	150	17%	50 100%	42 100%		28%	40%	3,8	1,0
P3	5	315	88	403	22%	81 162%	63 150%		14%	33%	4,1	0,6
P4	8	343	77	420	18%	53 105%	42 100%		21%	35%	4,1	0,6
P5	9	216	137	353	39%	39 78%	24 57%		38%	62%	3,5	0,2
BAUM 4												
K4	10	588	189	777	24%	78 100%	59 100%		9%	31%	3,7	0,4
P3	12	405	48	453	10%	38 49%	34 58%		9%	19%	3,3	0,4
P4	28	925	305	1234	25%	44 56%	33 56%		23%	42%	2,9	0,4
P5	32	364	670	1034	65%	32 41%	11 19%		24%	73%	2,7	0,8
BAUM 5												
K4	4	168	39	207	23%	52 100%	42 100%		19%	37%	3,5	0,1
P3	5	181	33	214	18%	43 83%	36 86%		20%	36%	3,2	0,2
P4	5	160	46	206	29%	41 79%	32 76%		25%	48%	3,2	0,2
P5	5	105	48	153	45%	31 60%	21 50%		34%	65%	3,1	0,1
SUMME												
K4	41	1491	363	1795	20%	44 100%	36 100%		14%	30%	3,6	0,6
P3	33	1101	193	1294	15%	39 89%	33 92%		16%	29%	3,3	0,7
P4	54	1557	444	2001	22%	37 84%	29 81%		24%	41%	3,2	1,2
P5	71	915	943	1858	51%	26 59%	13 36%		33%	67%	3,0	0,7

K4 Kontrollpollen 4 Tage exponiert

P3 3 Tage 820µg/m³ SO₂

P4 4 Tage 820µg/m³ SO₂

P5 5 Tage 820µg/m³ SO₂

1. Hohlkornanteil

Bei den weiblichen Blüten des Baumes 3 sowie bei unbestäubten, isolierten Blüten verholzten zwar die Samenschuppen, doch blieben die Zapfen klein und öffneten sich beim Klengvorgang nicht. Während der anschließenden mechanischen Zerkleinerung zeigte sich, daß weder bei den bestäubten Zapfen des Baums 3, noch bei den unbestäubten Kontrollen anderer Individuen Hohlkörner gebildet wurden. Offenbar ist bei *Picea omorika* die Bestäubung einer befruchtungsfähigen Samenanlage als Entwicklungsanstoß zur Ausbildung der Testa notwendig. Unter dieser Voraussetzung gibt der Hohlkornanteil Hinweise auf die Anzahl der fängischen, aber unbefruchteten Samenanlagen zum Bestäubungszeitpunkt.

Für Baum 3 ist anzunehmen, daß dessen Blüten zum Zeitpunkt der Bestäubung nicht fängisch waren. Weit weniger wahrscheinlich ist es, daß Inkompatibilitätserscheinungen für diese Entwicklung verantwortlich sind, denn zur Bestäubung wurde ein Pollengemisch von 7 Individuen verwendet.

In Tab. 55 ist der Anteil der mit bloßem Auge erkennbaren Hohlkörner in Spalte 4 aufgeführt. Er ist bei den mit 3- und 4-Tage lang begasten Pollen und mit Kontrollpollen bestäubten Zapfen annähernd gleich. Die fünf Tage lang SO_2 ausgesetzten Pollen weisen deutlich höhere Hohlkornanteile auf.

2. Samenzahl pro entwickelte Zapfen

Die Samenzahl pro Zapfen schwankt in Abhängigkeit von der Anzahl der fängischen Samenanlagen zum Bestäubungszeitpunkt. Dieses Kriterium gibt daher als Einzelwert wenig Auskunft über den Befruchtungserfolg. Bei einer großen Zapfenzahl und aufgrund der Stichprobenauswahl (s. Abschn. 2.4.4), die gerichtete Umwelteinflüsse auf die Fängigkeit der weiblichen Blüten und die Samenentwicklung ausschließt, kann man davon ausgehen, daß die Zahl der fängischen Samenanlagen zum Bestäubungszeitpunkt pro Behandlungsvariante etwa gleich groß ist. Damit läßt sich die Zahl der gebildeten Samen pro Zapfen als Indiz für den Befruchtungserfolg heranziehen.

In Tab. 55 wird die Samenzahl pro Zapfen in Spalte 5 aufgeführt. Die erste Kolonne zeigt die absolute Anzahl aller Samen (Vollkorn und Hohlkorn), die zweite den Relativwert (Kontrolle = 100). In der dritten Kolonne sind nur die vollen Samen pro Zapfen aufgeführt, die vierte zeigt wieder den relativen Wert bezogen auf die Kontrolle.

Die Samenzahl pro Zapfen liegt bei Behandlung P5 deutlich tiefer als bei allen anderen Varianten.

Samenzahlen von P3 und P4 zeigen im Verhältnis zur Kontrolle starke individuelle Schwankungen. Bei Baum 2 beträgt die Zahl der Samen pro Zapfen im Verhältnis zur Zahl der Samen der Kontrolle zwischen 100 und 150%, bei Baum 4 um 50%.

Die starke individuelle Reaktion läßt vermuten, daß Pollen der Einzelbäume unterschiedlich stark durch die SO₂-Begasung beeinträchtigt wurde (vgl. 3.2.3.2). Wird Pollen einer Mischprobe, der sich aufgrund von Kompatibilitätsmechanismen bevorzugt zur Befruchtung des einen Individuums eignet, selektiv eliminiert, so muß dessen Samenansatz geringer sein als beim Vergleichsbaum, für den der SO₂-sensible Pollenanteil inkompatibel ist.

3. Hohlkornanteil im Röntgenbild

Im Röntgenbild zeigt sich, ob äußerlich als Vollkörner erscheinende Samen einen Embryo gebildet haben oder nur Endosperm. Zur Endospermentwicklung ist bei Gymnospermen keine Befruchtung notwendig.

Der Prozentsatz, äußerlich als Vollkorn erscheinender, im Röntgenbild jedoch als Hohlkörner erkennbarer Samen, ist in Tab. 55 in Spalte 6 aufgeführt. Offenkundig nimmt deren Zahl mit steigender SO_2 -Belastung des Pollens zu. Insbesondere sind die Werte für P5 Zapfen deutlich höher als für K4 und P3.

Dadurch wird die Tendenz für den mit bloßem Auge erkennbaren Hohlkornanteil bestätigt.

Spalte 7 der Tabelle gibt den gesamten Hohlkornanteil der Probe an. P3 unterscheidet sich nicht von der Kontrolle. P5 hingegen ist doppelt so hoch und P4 nimmt eine Mittelstellung ein.

4. Tausendkorngewicht

Zur Ermittlung des Tausendkorngewichts wurden die visuell erkennbaren Hohlkörner ausgelesen und alle Samen einer Probe gewogen. In Tab. 55, Spalte 8 wird die tendenzielle Abnahme des Tausendkorngewichts mit zunehmender SO_2 -Exposition des Pollens sichtbar.

3.3.3 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

Wird Pollen von *Picea omorika* 5 Tage lang $820\mu\text{g}/\text{m}^3$ SO_2 ausgesetzt, so ist sein Keimprozent gegenüber der 4 Tage lang exponierten Kontrollprobe nicht vermindert, nur die mittlere PSL ist 10% kürzer. So behandelter Pollen erscheint bei in vitro Keimtests noch sehr vital. Alle Autoren (VARSHNEY & VARSHNEY 1982, BONTE 1982), die sich mit SO_2 -Begasungen von trockenen Pollen beschäftigen, heben dessen Widerstandsfähigkeit auch gegenüber hohen SO_2 -Dosen hervor. Als Maßstab dafür wurde stets das Keimprozent und/oder die Pollenschlauchlänge zugrundegelegt.

In vivo führte die Bestäubung mit solcherart vorbehandeltem Pollen jedoch zu deutlichen Veränderungen im Samenansatz:

Der Hohlkornanteil war doppelt so hoch wie bei Proben, die aus Bestäubung mit Kontrollpollen hervorgegangen sind, es entwickelten sich weniger Samen pro bestäubtem Blütenstand, insgesamt wurden nur 36% der vollen Samen pro Zapfen der Kontrollprobe erreicht, auch das Tausendkorngewicht ist vermindert.

Da der Kontrollpollen nur 4 Tage exponiert war, der P5-Pollen dagegen 5 Tage, muß hier auf einen unmittelbaren Vergleich verzichtet werden, anders dagegen bei der Pollenprobe P4:

Die Pollenpartien P4 und K4 waren gleich lange unter gleichen Bedingungen exponiert; P4 wurde zusätzlich mit $820\mu\text{g}/\text{m}^3$ SO_2 begast. D.h. alle Unterschiede zwischen diesen beiden Proben sind alleine auf den SO_2 Einfluß zurückzuführen.

Im anschließenden in vitro Keimungstest unterschieden sich weder die PSL noch das Keimprozent der beiden Pollenproben signifikant. Trotzdem ergaben sich nach der Bestäubung deutliche Unterschiede im Samenansatz.

Bei Bestäubung mit begasten Pollen werden weniger Samen

pro Zapfen gebildet, der Hohlkornanteil ist größer, das Tausendkorngewicht geringer. Obwohl es individuelle Reaktionen der Einzelbäume gab (Baum 2 zeigte bei Bestäubung mit SO_2 -begasten Pollen einen geringeren Hohlkornanteil bei gleicher Samenzahl pro Zapfen) belegen die zusammengefaßten Werte aller Testbäume eine Beeinträchtigung der Befruchtungsfähigkeit des SO_2 -begasten Pollens.

Weniger deutlich ist diese Tendenz bei Bestäubung mit Pollen P3, der $820\mu\text{g}/\text{m}^3$ SO_2 nur 3 Tage ausgesetzt war. Der Hohlkornanteil war teils gleich, teils größer, teils geringer als bei der Kontrolle, so daß bei diesem Parameter kein Einfluß feststellbar ist.

Die Samenzahl pro Zapfen lag nur geringfügig unter der der Kontrolle, da Baum 2 als Ausnahme deutlich mehr Samen pro Zapfen bei Bestäubung mit begastem Pollen bildete als bei Bestäubung mit unbegastem Pollen. Das Tausendkorngewicht lag, wie bei den anderen Behandlungen, unter dem Kontrollwert. Insgesamt fügen sich diese Werte in den allgemeinen Trend ein, wonach der Befruchtungserfolg von SO_2 -begastem Pollen mit steigender SO_2 -Einwirkung zurückgeht.

3.4 Freilanderhebungen

Durch Freilanderhebungen sollte überprüft werden, ob stärker vom Waldsterben betroffene Waldgebiete oder Individuen abweichende Pollenkeimung, Zapfenproduktion oder Samenvitalität gegenüber gering geschädigten Gebieten oder Individuen zeigen. Als Maßstab für die Pollenvitalität diene das Keimprozent der Pollenprobe und ihre mittlere Pollenschlauchlänge (PSL) bei *in vitro*-Keimung.

Um entsprechende Unterschiede feststellen zu können, müssen die natürliche Varianz dieser Merkmale unter dem Einfluß exogener Faktoren wie auch die genetische Streubreite bekannt sein.

Die Zahl pollenproduzierender Individuen sowie die Pollenerzeugung selbst, schwankt von Jahr zu Jahr in erheblichen Maße. Der Zeitraum der Pollengewinnung ist auf maximal eine Woche begrenzt. Diese natürlichen Gegebenheiten erschweren eine Standardisierung der Untersuchungen. Nicht standardisierbare Umweltfaktoren, wie z.B. Witterungsbedingungen, Exposition der Blüte am Baum usw., können nur berücksichtigt werden, wenn man ihre Wirkung auf das Pollenschlauchwachstum kennt.

Entsprechende Vorversuche sollten die Bedeutung einiger exogener Faktoren auf die Pollenkeimung erkennen helfen.

3.4.1 Vorversuche

3.4.1.1 Einfluß von Erntemethode und Witterung auf die Pollenkeimung

An Probematerial, das im Mai 1985 im FoA Sauerlach gewonnen worden war, wurde der Einfluß von Witterung und Erntemethode auf die Werte der Pollenkeimung geprüft. Wie Tab. 56 zeigt, verringerte sich die Vitalität der Pollen stark unter Feuchtigkeitseinwirkungen. Bei Nieselregen oder feuchter Witterung geernteter Pollen bildet um 11% kürzere mittlere Pollenschlauchlängen aus als Pollen, der an sonnigen, trockenen Tagen geerntet wurde.

TABELLE 56 Pollenvitalität von Fichte (K% und PSL) in Abhängigkeit von Witterungsverhältnissen zum Erntezeitpunkt, geerntet Sauerlach 1985.

Witterung zum Erntezeitpunkt	K%			PSL in μm		
	$\bar{x}$	sd _i	Sig	$\bar{x}$	sd _i	Sig
trocken, sonnig	90%	9	n.s.	147 μm	16	**
feucht, Nieselregen	88%	12		134 μm	23	

Generell reagierten Pollen, die vor der Keimung mit Feuchtigkeit in Berührung kamen mit Vitalitätsverlust. Proben, die z.B. durch kondensierende Eigenfeuchtigkeit der Blüte beim Transport in luftundurchlässigen Tüten anquollen, verloren 20% ihrer Keimkraft, wie in Tab. 57 dargestellt.

TABELLE 57 Keimprozent von feucht gewordenem und trockenem Fichtenpollen (Sauerlach, 1985).
N=5; N_r=1000

Probe	Keimprozent		Sig.
	$\bar{x}$	sd _i	
trocken	92%	5,7	***
feucht	73%	2,9	

Pollen, von vor einigen Tagen gefällten oder durch Windwurf entwurzelten Fichten, unterschieden sich im Keimprozent und in der Pollenschlauchlänge von Pollen, die von stehenden Fichten geerntet wurden und eigneten sich daher nicht für vergleichende Untersuchungen (Tab. 58).

TABELLE 58 Pollenvitalität (Keimprozent: K% und PSL) von Proben entwurzelter Fichten und stehender Fichten (Sauerlach 1985) N=5

Pollen von	K%		Sig.	PSL in μm		Sig.
	$\bar{x}$	sd _i		$\bar{x}$	sd _i	
entwurzelten	74%	16,4	*	117 μm	18	***
Altfichten						
stehenden	87%	9,2		140 μm	20	
Altfichten						

Möglichst an trockenen, warmen Tagen und zu Zeiten, an denen der natürliche Pollenflug einsetzte, wurden die Pollen incl. Zweig von stehenden Bäumen geerntet, in luftdurchlässigen Papiertüten transportiert und sofort nach dem Ausstäuben auf Papierbögen luftgetrocknet. (2-3 Tage in Laborräumen mit ca 40% rel. Luftfeuchte). Witterungsbedingte Einflüsse konnten jedoch nicht immer vermieden werden und sind an entsprechender Stelle vermerkt.

3.4.1.2. Kleinstandörtliche Unterschiede

Kiefernpollen von zwei verschiedenen Standortseinheiten (STOE 9 und 12), des gleichen Distrikts im Forstamt FFB, wurde untersucht um ungleiche kleinstandörtliche Einflüsse zu überprüfen.

Die durchschnittliche Pollenschlauchlänge aller von der Standortseinheit 9 untersuchten Pollen betrug 79µm. Der entsprechende Mittelwert für die Standortseinheit (STOE) 12 lag bei 74µm. An der STOE 12 wurden allerdings nur Bäume des Nordostrandes untersucht (Nordstrand entspricht Südwestexposition). Zieht man für die STOE 9 ebenfalls nur die Bäume des Nordostrandes heran, so liegt deren Mittel bei 72µm. Die Kiefern keimten also unabhängig von der sich geringfügig unterscheidenden Standortseinheit zu gleich langen Pollenschläuchen aus (Tab. 59).

TABELLE 59 Einfluß des Kleinstandorts auf die PSL von 30jährigen Kiefern in FFB 1986

Standortseinheit (STOE) laut Operat	PSL in µm		N
	$\bar{x}$	sd ₁	
STOE 9			
(alle Expositionen)	79	17,5	18
STOE 12	74	20,5	5
STOE 9 nur Süd- Westexposition	72	17,1	9

3.4.1.3. Einfluß des Entnahmeorts in der Krone

Kronenhöhe

Um festzustellen, ob jede Pollenprobe unabhängig von ihrem Entnahmeort in der Baumkrone repräsentativ für diesen Baum ist, wurden Pollenproben aus der Licht- und Schattenkrone 30jähriger Kiefern verglichen. Die Ergebnisse sind in Tab. 60 aufgeführt. Zwischen 200 gemessenen Pollenschlauchlängen aus dem oberen und 200 PSL aus dem unteren Kronenbereich besteht bei beiden untersuchten Bäumen ein Unterschied, der zwar signifikant absicherbar ist, jedoch für die Probengewinnung unbedeutend bleibt, da er nur 1% der mittleren Pollenschlauchlänge beträgt.

TABELLE 60 Einfluß des Entnahmeorts in der Krone auf die mittlere PSL ($\bar{x}$) bei 30jährigen Kiefern in FFB 1986. ($N_F=200$)

Entnahmeort in der Krone	PSL in μm			PSL in μm		
	$\bar{x}$	sd	Sig	$\bar{x}$	sd	Sig
Baumnr.	4			5		
oben	85 μm	37	***	88 μm	60	***
unten	84 μm	35		87 μm	44	

Sonnenexposition

Die Exposition zum Licht spielt bei der Induktion der Blüte eine maßgebliche Rolle. Randbäume eines Bestandes blühen durch den erhöhten Lichtgenuß häufiger und intensiver als Bäume im Bestandesinnern (ROHMEDER 1972). Auch MARCET (1951) mutmaßt, daß sich der Lichtgenuß während der Pollenbildung in der Keimkraft bemerkbar macht. Nach verschiedenen Himmelsrichtungen orientierte Bestandesränder sind unterschiedlichen Licht- und Wärmeeinstrahlungen ausgesetzt. Ob sich diese Differenzen in der Vitalität des Pollens auswirkt, sollten entsprechende Untersuchungen an 30j. Bäumen eines Kiefernbestandes klären, der einen 0,3 ha großen Wildacker umschloß und dadurch auf kleiner Fläche Bestandesränder nach allen Himmelsrichtungen aufwies.

Die einzelnen Werte sind in Tab. 61 aufgeführt, aus der sich ablesen läßt, daß die Exposition einen Einfluß haben kann: Pollen, die sich unter geringer Sonneneinstrahlung entwickelt haben (an Nord- und West exponierten Kronen) keimen unter den gegebenen Laborbedingungen zu 50% längeren Pollenschläuchen aus, als Pollen von nach Süden orientierten Zweigen. Die Ostexposition nimmt eine Mittelstellung ein. Die genetische Varianz zwischen den Individuen erlaubte bei der Stichprobenzahl von N=5 (Bäume) je Exposition keine statistische Absicherung. Diese Tendenzen lassen sich, nach der bei diesem Versuch

ermittelten Standardabweichung, nur absichern, wenn 20 Bäume pro Exposition untersucht werden. Eine entsprechende Zahl blühender Bäume stand auf dieser Fläche nicht zur Verfügung. Einzig der Mittelwert der PSL der Exposition Süd ließ sich gegenüber Nord ($\alpha=0,011$; Sig.*) und West ($\alpha=0,006$, Sig.: **) statistisch sichern.

TABELLE 61 Mittlere PSL ($\bar{x}$) in Abhängigkeit von der Stellung der Blüte zum Licht (Erklärung im Text)

Exposition		1	2	3	4	5	Ges.	
Baum		$\bar{x}$	$\bar{x}$	$\bar{x}$	$\bar{x}$	$\bar{x}$	$\bar{x}$	sd
NORD		76	89	108	105	73	90,2	16,1
WEST		85	87	65	90	100	85,4	12,8
OST		62	63	98	75		74,5	16,7
SÜD		62	60	54	61		59,3	3,6
GESAMT							78,5	17,2

Obwohl das Probematerial für eine umfassendere statistische Auswertung nicht ausreichte, konnten Hinweise für die Probensammlung abgeleitet werden: Für die Untersuchungen an Fichte von Abschn. 3.4.2.1 wurden nur licht-exponierte Blüten aus dem unteren Kronenbereich verwendet.

3.4.1.4. Einfluß des Abblühstadiums

Inwieweit der Reifegrad der Blüte die Vitalität des entlassenen Pollens beeinflusst, wurde überprüft, indem Pollen aus als Knospen geernteten Blüten (a), aus reifen Blüten (b) und aus Blüten, die den Hauptanteil der Pollen schon entlassen hatten (c) zur Keimung angesetzt wurden. Es zeigte sich, daß Blüten auf dem Höhepunkt der Pollenentlassung den Pollen mit dem höchsten Keimprozent enthalten, der außerdem zur längsten mittleren PSL auskeimt. Pollen unreifer Blüten bilden in der vorgegebenen Zeit kürzere PSL, erreichen jedoch annähernd das gleiche Keimprozent. In gealterten Blüten verbliebener Pollen keimt zu geringerem Prozentsatz (Tab. 62). Die Unterschiede in der PSL und im Keimprozent konnten auf dem $p < 0,01$ Signifikanzniveau abgesichert werden. EISENHUT (1961) beschreibt bei *Abies* eine erhöhte Zahl mißgebildeter Pollen in gealterten Blüten und schloß daraus, daß zuerst die vitalsten Pollen entlassen werden.

TABELLE 62 Einfluß des Reifegrades der Blüte auf die Pollenkeimung bei Fichte

Reifegrad	PSL in μm		K%		PSL · K%
	$\bar{x}$	sd_1	$\bar{x}$	sd_1	
überreif	104	2	36	10	37,4
reif	117	2,8	47	1	55,0
Knospe	89	4,2	41	1	36,5

Bei allen weiteren Versuchen wurden diese Unterschiede ausgeschlossen, indem alle Knospen und überreife Blüten vom Zweig entfernt und nur reife Blüten zum Ausstäuben belassen wurden.

3.4.1.5. Varianz der Pollenschlauchlänge und des Keimprozents

Auf die Vitalität des Pollens wirkt ein Gefüge endogener und exogener Faktoren ein, deren Einfluß meist nicht isoliert betrachtet werden kann.

Die PSL variiert zwischen den einzelnen Pollenkörnern, die mittlere PSL unterscheidet sich von Blüte zu Blüte und von Baum zu Baum. Das Keimprozent differiert zwischen den einzelnen Blüten und den Individuen.

Zur Bestimmung der erforderlichen Stichprobengröße ist die Kenntnis der Varianz Voraussetzung.

3.4.1.5.1 Varianz der Pollenschlauchlänge und des Keimprozentes bei Fichte

3.4.1.5.1.1 Varianz der PSL zwischen den einzelnen Pollenkörnern

Bei den hier durchgeführten Experimenten wuchs der Pollenschlauch des Fichtenpollens zu einer theoretischen Länge von $0\mu\text{m}$ des ungekeimten Pollenkorns bis zu maximal $350\mu\text{m}$ aus. Die Standardabweichung s_d zwischen den Pollen innerhalb einer Probe schwankt zwischen 28 und 41.

Zur Veranschaulichung der Häufigkeitsverteilung der Pollenschlauchlängen von Fichtenpollen innerhalb einer Petrischale und deren statistischen Kennwerten dient Abb. 13. Pro Schale wurden 100 Pollenschläuche ($N_p=100$) gemessen, damit die Stichprobe mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 2,8%-4,1% die mittlere PSL repräsentiert.

Nach 48 Std Keimdauer entsprach die Häufigkeitsverteilung der PSL annähernd einer Normalverteilung. Die Häufigkeitsverteilungen der Pollenschlauchlänge verhielt sich in Abhängigkeit von der Keimdauer wie in Abb. 12 a, b, c dargestellt.

Abb. 12 Häufigkeitsverteilung der PSL bei Keimung unter Standardbedingungen: a: Hyperbelform nach kurzer Keimdauer, b: normalverteilt nach 48ständiger Keimdauer c: rechtsschiefe Verteilung nach längerer Keimdauer

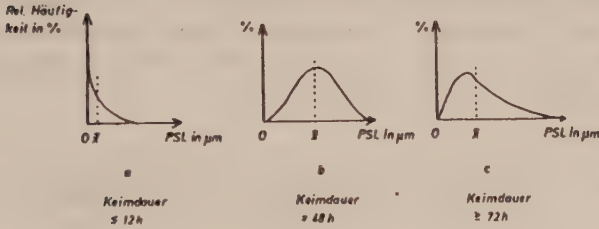
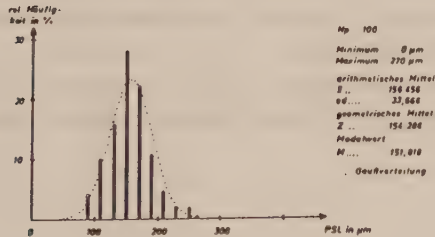


Abb. 13 Beispiel einer Häufigkeitsverteilung der Keimschlauchlänge von Fichtenpollen innerhalb einer Petrischale



3.4.1.5.1.2. Varianz der PSL und des Keimprozents zwischen den Blüten eines Individuums

Die mittlere PSL unterscheidet sich auch zwischen gleichreifen Blüten eines Baumes. Die Standardabweichung sd_1 beträgt dabei, je nach untersuchtem Individuum, innerhalb eines Baumes zwischen 2,1 und 15,3. In Tab. 63 sind die mittleren PSL pro Blüte des Baumes mit der geringsten und mit der größten Standardabweichung dargestellt.

TABELLE 63 Mittlere PSL in μm von Fi-Pollen zweier Baumindividuen (Beispiel für die Abweichung der mittleren PSL zwischen Einzelblüten)

Blüte	mittlere PSL in μm	
	Baum 1	Baum 2
1	104	98
2	102	110
3	105	89
4	101	105
sd_1	2,1	15,3

Die Ursache dieser Differenz ist ungeklärt.

Von den verfügbaren 5 bis maximal 10 reifen Blüten eines Baumes wurde bei den späteren Untersuchungen eine Mischprobe mit vier Wiederholungen angesetzt. Die Standardabweichung (sd_1) zwischen den Mischproben lag zwischen 2,2 und 7,4.

Die Standardabweichung des Keimprozents von Pollen verschiedener Blüten eines Baumes betrug maximal 10.

3.4.1.5.1.3 Interindividuelle Varianz

Die Länge der PS und das Keimprozent der Pollen schwankt innerhalb der Art, der gleichen Altersklasse und desselben Standorts in hohem Maße. Dabei läßt sich nicht trennen, inwieweit genetische Veranlagung oder exogene Faktoren dafür verantwortlich sind. Die interindividuellen Schwankungen für Fichte 1987 sind in Tab. 64 zusammengestellt.

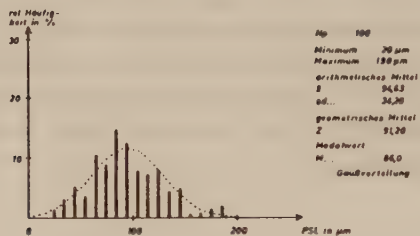
TABELLE 64 Mittlere PSL ($\bar{x}$) in μm und Keimprozent (K%) bei 100jährigen Fichten 1987 (Interindividuelle Schwankungen)

	Min x	Max x	$\bar{x}$	sd	K%	sd	N
Versuchsfläche							
Sauerlach	136	216	172	21,5	93%	5	12
FFB	102	192	157	28,7	98%	2	14

3.4.1.5.2 Varianz der PSL bei Kiefer

Die Häufigkeiten der Pollenschlauchlängen war bei Kiefer nach 96 Std Keimung normalverteilt. Dabei betrug die Standardabweichung sd , um den Mittelwert $\bar{x}$ zwischen 24 und 44. Dies erforderte wie bei der Fichte eine Messung von 100 Pollenschläuchen ($N_p=100$) zur Ermittlung des repräsentativen Mittelwerts mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von kleiner als 5%. Als Beispiel für die Verteilung der PSL einer Probe dient Abb. 14.

Abb. 14 Häufigkeitsverteilung der PSL von Kiefernpollen



Die Schwankungen der mittleren PSL von Blüte zu Blüte waren bei den untersuchten 30jährigen Kiefern geringer als bei den 100jährigen Fichten. Die Standardabweichung sd lag hier immer unter 6,7. Auch bei dieser Baumart wurden 4 Wiederholungen einer Mischprobe aus mindestens drei männlichen Blüten angesetzt.

Die Streubreite zwischen den einzelnen Individuen ist in Tab. 65 dargestellt.

TABELLE 65 Mittlere PSL ($\bar{x}$) und Keimprozent (K%): Inter-individuelle Schwankungen bei Kie-Pollen, 1987 (N=20)

Alter in Jahren	Versuchsfläche	Pollenschlauchlänge				Keimprozent			
		Min	Max	$\bar{x}$	sd _i	Min	Max	$\bar{x}$	sd _i
15-40	Sauerlach	48	134	94	22,4	20%	92%	54%	18
30	FFB	54	108	79	17,2	75%	96%	82%	11

Die Probekollektive unterscheiden sich in der Altershomogenität. Es läßt sich dadurch nicht feststellen ob die geringere individuelle Varianz der mittleren PSL in FFB auf ihre Gleichaltrigkeit oder auf genetische Ursachen zurückzuführen ist. Insgesamt erreichten die Kiefern aus Sauerlach längere PSL als die aus FFB, bei gleichzeitig deutlich niedrigerem Keimprozent. Legt man bei der Bestimmung der Pollenvitalität das Produkt aus Keimprozent und Pollenschlauchlänge zugrunde, ist die Pollenvitalität in FFB mit 65µm% höher als in Sauerlach mit 51µm%.

3.4.2 Zusammenhang zwischen Waldschäden und generativen Merkmalen

3.4.2.1 Pollenkeimung

1987, in einem Jahr mit geringer Fichtenblüte, wurde im stark vom Waldsterben betroffenen Forstamt Sauerlach (Schadgrad 70%, durchschnittliches Entnadelungsprozent 32%) von zwölf 100j. Fichten und in Fürstenfeldbruck, einem Forstamt mit relativ gering geschädigten Bäumen (Schadgrad 43%, durchschnittliches Entnadelungsprozent 18%), von 14 ebenfalls 100jährigen Fichten Pollen gewonnen.

Die Ernte erfolgte an zwei aufeinanderfolgenden Tagen mit unterschiedlichen Wetterbedingungen. Bei der Ernte in Sauerlach war das Wetter trocken, in Fürstenfeldbruck herrschte feuchtes Nieselwetter.

Die mittlere durchschnittliche Pollenschlauchlänge lag in FFB mit $157\mu\text{m}$ (sd 28,7) unter der mittleren PSL in Sauerlach mit $172\mu\text{m}$ (sd 21,5). Obwohl die Differenz beträchtlich ist, war sie nicht absicherbar ($\alpha=0,141$ Sig.: n.s.). Das Keimprozent liegt in FFB dagegen geringfügig, aber signifikant höher ($\alpha=0,019$, Sig.: *) (Tab. 66 und 67).

Unterschiede zwischen den Beständen können auf vielfältigen Einflüssen beruhen, wie die Untersuchungen von Abschn. 3.4.1 belegen. Unterschiedliche Witterungsbedingungen und Exposition des Bestandesrandes spielen ebenso eine Rolle, wie populationsgenetische Unterschiede zwischen den Beständen.

Aus diesem Grund schien ein präziser Vergleich zweier, verschieden stark vom Waldsterben betroffener, Bestände hinsichtlich ihrer Pollenvitalität im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Die Untersuchungen beschränken

sich im Folgenden daher auf den Zusammenhang zwischen dem individuellen Schadgrad des Einzelbaumes und dessen Pollenvitalität. Der Gesundheitszustand wurde durch das Entnadelungsprozent (Ent%) ausgedrückt.

In Tab. 67 sind die Kennwerte der Pollenkeimung für Sauerlach, in Tab. 66 für FFB dargestellt. Um die Pollenkeimung der Fürstenfeldbrucker Fichten mit denen aus Sauerlach vergleichen zu können, wurde die PSL in Prozent vom Mittelwert $\bar{x}$ angegeben (jeweils Spalte 4). Das Produkt aus K% und PSL wurde als neues Maß für die Pollenvitalität eingeführt und bezeichnet die durchschnittliche Länge aller Pollenschläuche, inklusive der ungekeimten Pollen (Spalte 6).

TABELLE 66 Pollenvitalität (K%, PSL) in Abhängigkeit vom Entnadelungsprozent (Ent%): Fichte, FFB, 1987.

Baum Nr.	Ent%	Pollenschlauchlänge in μm	K% in% von $\bar{x}$	K%·PSL	
10	50%	182 μm	116%	98%	178
09	50%	180 μm	115%	98%	177
07	40%	162 μm	103%	99%	160
04	30%	102 μm	65%	96%	94
01	30%	150 μm	96%	98%	149
12	30%	120 μm	76%	99%	117
03	20%	146 μm	93%	97%	141
02	20%	161 μm	103%	99%	159
05	20%	122 μm	78%	93%	113
11	20%	185 μm	118%	99%	183
06	10%	159 μm	101%	97%	154
13	05%	146 μm	93%	98%	143
08	00%	197 μm	125%	99%	195
14	00%	192 μm	122%	98%	188
$\bar{x}$	23%	157 μm	100%	98%	154
sd	16	29	18	2	30

TABELLE 67 Pollenvitalität (K%,PSL) in Abhängigkeit vom Entnadelungsprozent (Ent%): Fichte, Sauerlach 1987.

Baum Nr.	Ent%	Pollenschlauchlänge in μm in% von $\bar{x}$	K%	K%·PSL
314	75%	172	99%	162
323	70%	178	103%	171
207	40%	216	125%	208
239	40%	175	101%	170
707	35%	152	88%	141
701	30%	185	107%	170
205	30%	193	112%	183
307	25%	171	99%	163
215	25%	184	106%	182
212	25%	136	79%	127
211	20%	145	84%	120
210	15%	167	97%	139
$\bar{x}$	36%	172	100%	161
sd	19	22	13	25

Zur statistischen Auswertung wurden die Einzelindividuen nach ihrem Entnadelungsprozent zu Gruppen gleicher Schadstufen zusammengefaßt. Dabei fielen Individuen mit weniger als 15% Nadelverlust in die Schadstufe 0, zwischen 15% und 25% in Schadstufe 1, bis 65% in Schadstufe 2 und darüber in Schadstufe 3. Die Varianzanalyse ergab weder für das Keimprozent noch für die PSL Unterschiede zwischen den Schadstufen.

Zur Überprüfung dieser Ergebnisse wurden im Frühjahr 1988 auf der gleichen Fläche in Sauerlach 25 Bäume beerntet. Vier dieser Fichten gehörten zur Schadklasse 0, sechs zur Schadklasse 1, neun zur Schadklasse 2 und sechs zur Schadklasse 3.

1988 blühten die Fichten vierzehn Tage früher und wesentlich reichlicher als 1987. Die Keimergebnisse lagen 1988, sowohl was die PSL als auch was das K% betrifft, auffallend unter den Werten von 1987: Der Mittelwert aller untersuchten Bäume betrug 97 μ m mit einer Standardabweichung von 20,0 das Keimprozent betrug im Mittel nur 40% mit Abweichung von 25% nach oben und unten. Die Pollenschlauchlänge und das Keimprozent sind in Abhängigkeit vom Nadelverlust in Abb. 15 und 16 dargestellt. Die Punktwolke läßt keinen Zusammenhang zwischen Entnadelungsprozent und Kenngrößen der Pollenkeimung erkennen. Damit wurden die Vorjahresergebnisse bestätigt: Weder die PSL noch das Keimprozent läßt sich mit der Benadelungsdichte des Spenderbaums korrelieren. Die Varianzanalyse ergab wiederum keine Unterschiede der mittleren PSL bzw. des Keimprozentos zwischen den Schadstufen.

Abb. 15 PSL in Abhängigkeit vom Entnadelungsprozent des Erntebaums. Fichte, Sauerlach 1988 N=25

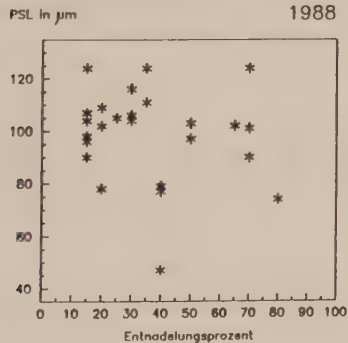
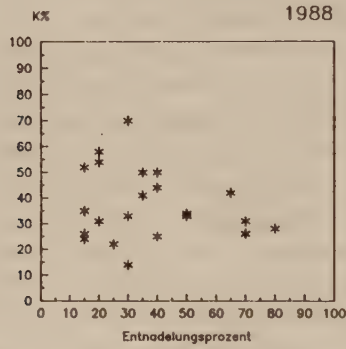


Abb. 16 Pollenkeimprozent in Abhängigkeit vom Entnadelungsprozent des Erntebaums. N=25
Fichte, Sauerlach 1988



3.4.2.2 Zapfenbehang und Samenvitalität

In Sauerlach wurde auf der gleichen Waldfläche, auf der die Pollenernte durchgeführt wurde, im Herbst 1987 und 1988 der Zapfenbehang von jeweils 50 Fichten erfaßt. 1988 fruktifizierten die Fichten deutlich stärker als 1987. In Abb. 17 und 18 wird nach Erntejahr getrennt, die Zapfenzahl pro Baum in Relation zu seinem Entnadelungsprozent dargestellt. Beide Darstellungen zeigen eine ähnliche Punkteverteilung. Die größte Streuung der Zapfenzahl findet sich bei Individuen mit 15-25% Nadelverlust. Obwohl die Punktwolken den optischen Eindruck erwecken, daß der Zapfenbehang gerichtet mit dem Entnadelungsprozent auftritt unterscheiden sich die Mittelwerte der einzelnen Schadstufen nicht (Tab. 68). Nach der Varianzanalyse unterscheiden sich keine zwei Gruppen signifikant. Auch der zweiseitige T-Test zeigte keinen Unterschied zwischen gesunden (Ent% 0-25%) und kranken (mehr als 25% Nadelverlust) Individuen.

TABELLE 68 Mittlere Zapfenzahl ($\bar{x}$) pro Baum je Schadklasse (Sk1) (Fichte, Sauerlach 1987, 1988)

Ent%	Sk1	1987			1988		
		$\bar{x}$	sd	N	$\bar{x}$	sd	N
0-15%	0	45	87	6	89	71	8
15-25%	1	24	29	16	91	85	9
25-65%	2	36	29	24	95	72	25
65-99%	3	12	19	4	98	115	8

Abb. 17: Zapfenzahl in Abhängigkeit vom Entnadelungs-
prozent (Ent%) Fi 1987 Sauerlach

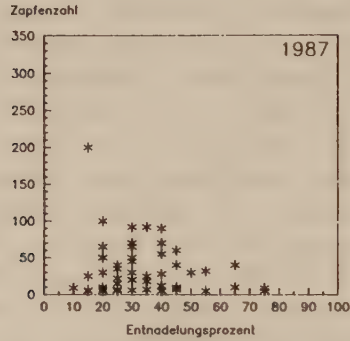
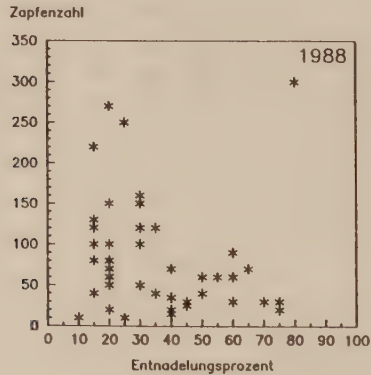


Abb. 18: Zapfenzahl in Abhängigkeit vom Entnadelungs-
prozent (Ent%), Fi 1988, Sauerlach



Von zehn dieser Bäume wurden Zapfen geerntet und deren Samen untersucht. Tab. 69 zeigt die entsprechenden Tausendkorngewichte, Keimprozent und Vollkornanteile (im Röntgenbild). Zwischen den einzelnen Individuen schwanken diese Größen stark, doch ist kein Trend mit zunehmender Schädigung erkennbar. Auch zwischen der Gruppe der gesunden ($\text{Ent}\% \leq 25\%$) und der Gruppe der geschädigten ($\text{Ent}\% \geq 35\%$) Bäume lassen sich keine Unterschiede bei den genannten Saatgut-Merkmalen nachweisen.

TABELLE 69 Tausendkorngewicht (TKG), Keimprozent und Vollkornanteil von Fichtensamen in Abhängigkeit vom Entnadelungsprozent (Ent%) des Erntebaums (FA Sauerlach 1987)

Baum-Nr.	Ent%	Samenzahl /Zapfen	Vollkorn% geröntgt	Keimprozent des Vollkorns				TKG in g
				3.Tag	6.Tag	9.Tag	12.Tag	
1	10%	143	13%	0%	19%	23%	23%	4,27
2	15%	150	36%	0%	17%	29%	29%	7,32
3	25%	74	29%	0%	44%	48%	50%	7,33
4	25%	73	16%	0%	58%	58%	58%	4,69
5	35%	123	22%	0%	32%	43%	43%	6,53
6	40%	271	27%	0%	12%	25%	25%	7,26
7	40%	73	25%	0%	22%	30%	32%	5,76
8	50%	90	11%	0%	17%	24%	24%	4,43
9	60%	111	33%	0%	34%	36%	36%	6,83
10	75%	73	29%	0%	20%	31%	31%	6,13

Einige der Proben waren stark mit *Megastimus spec.* befallen. Äußerlich ist der Befall am Korn nicht erkennbar. Im Röntgenbild wird die Larve im Samen jedoch sichtbar. Mit Larven besetzte Samen wurden zum Hohlkorn gerechnet, da befallene Samen keimunfähig sind. Sowohl der Vollkornanteil, wie auch das Keimprozent, bei dessen Ermittlung nur die optisch als Hohlkorn erkennbaren Samen aussortiert wurden, lagen unter den Durchschnittswerten. Auch das Tausendkorngewicht liegt deutlich unter dem durchschnittlichen Samengewicht von *Picea abies* mit 7,7g (ROHMEDER 1972).

Insgesamt läßt sich für die Freilanderhebungen festhalten, daß Keimprozent und Pollenschlauchlänge von Fichtenpollen von einer Vielzahl von Faktoren beeinflußt wird. Diese bewirken starke Schwankungen der Keimungsergebnisse von Erntetermin zu Erntetermin und zwischen den Einzelbäumen. In diesem Faktorenkomplex tritt der Einfluß der von Waldschäden verursachten Störungen so stark zurück, daß auf der individuellen Ebene bei einer Stichprobe mit 25 Einzelbäumen kein Zusammenhang zwischen Entnadelungsprozent und Pollenkeimungsverhalten festgestellt werden konnte.

Auch Merkmale der Fruktifikation, wie Zapfenzahl pro Baum Tausendkorngewicht und Samenvitalität unterliegen starken Schwankungen, die nicht mit dem Entnadelungsprozent gerichtet auftreten.

4. Diskussion

Ziel dieser Arbeit war es, im Rahmen von Freiland-erhebungen und Laborversuchen mögliche Schädigungen am generativen System aufzudecken, die im weitesten Sinne mit dem Waldsterben in Zusammenhang stehen.

Derartige Schäden könnten auftreten: (a) während der Reifung von Pollen und Samenanlage (vor und während der Anthese), (b) bei Pollenentlassung und Pollenflug, (c) während der Pollenkeimung auf der Samenanlage und (d) bei der Befruchtung.

Allgemein gilt die Reproduktion, und speziell die Pollenkeimung als störungsanfällig (COX 1984, FEDER 1968, FEDER 1981, STANLEY & LINSKENS 1974), doch sind die einzelnen Phasen unterschiedlich empfindlich.

So ist der Pollen während der Transmission von Sporopollenin umgeben, einem Material, das chemisch außerordentlich widerstandsfähig und sogar gegen Kalilauge und Schwefelsäure resistent ist (EISENHUT 1961). Wohingegen der Keimschlauch in der Hauptsache aus Cellulose besteht. Die Spermazellen selbst sind ohne Zellwand.

Hinsichtlich der Mikrosporen bestehen drei Stadien, während derer Immissionswirkungen zum Tragen kommen können:

1. Pollenentwicklung
2. Transmission des Pollens
3. Pollenkeimung

Der Einfluß von Schadstoffen auf die einzelnen Entwicklungsstadien kann durch folgende Versuchsanstellungen separat erfaßt werden:

1. Langzeitexposition der Pflanze während der Pollenentwicklung
2. Exposition des trockenen Pollens
3. Exposition während der Pollenkeimung

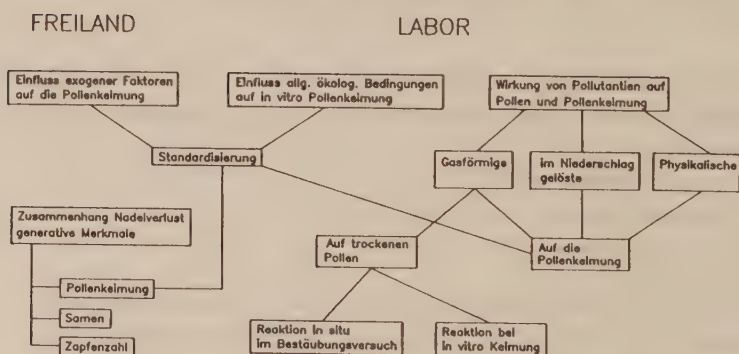
Die hierzu durchgeführten Versuche sind im Fließdiagramm (Abb. 19) dargestellt.

Durch Freilanderhebungen sollte außerdem geklärt werden, ob sich Pollenkeimung, Samenmerkmale und Zapfenzahl geschädigter Fichten von ungeschädigten Fichten unterscheiden.

Einwirkungen von Schadstoffen auf die Pollenkeimung wurden im Labor geprüft. Dabei wurde auch die Widerstandsfähigkeit von trockenem Pollen getestet.

Die biologische Relevanz der in *in vitro* Untersuchungen gefundenen Ergebnissen wurde in einem gesondertem Bestäubungsversuch *in situ* überprüft. Dabei ging es um die Frage, ob durch SO_2 vorgeschädigter Pollen, der geringere Keimschlauchlängen aufweist, auch in der Befruchtungsfähigkeit gestört ist.

Abb. 19 Überblick über die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen



4.1 Freilanderhebung

Erhebungen im Freiland sollten ermitteln, ob die für das Waldsterben typischen Nadelverlichtungen der Fichte mit Schädigungen des reproduktiven Prozesses einhergehen. Besonderes Augenmerk lag dabei auf Störungen der Mikrosporogenese. Als Maß für die Pollenvitalität wurde, wie bei diesen Erhebungen üblich (HOUSTON & DOCHINGER 1977, BEDA 1982), das Keimprozent und die Pollenschlauchlänge herangezogen.

Pathogene Veränderungen sind generell nur zu erkennen, wenn die Variabilität der untersuchten Eigenschaft und ihre Beeinflussung durch modifizierende Faktoren bekannt sind.

Deswegen wurde der Einfluß derartiger Faktoren, die die Vitalität der gebildeten Pollen mitbestimmen, in einer Reihe von Vorversuchen analysiert. Jedoch reichte der Pollenertrag an Fichte in den Versuchsjahren 1986 und 1987 nicht aus, um die Frage nach äußeren Einflüssen erschöpfend zu beantworten. Ein Teil dieser Untersuchungen wurde deswegen an Kiefer durchgeführt. Dies brachte den Nachteil mit sich, daß die gewonnenen Ergebnisse nicht unmittelbar auf Erhebungen an Fichte übertragbar sind. Dennoch lassen sich wertvolle Hinweise für die Probengewinnung ableiten.

So zeigte sich unter anderem eine Abhängigkeit des Keimprozent und der Pollenschlauchlänge vom Reifegrad der Blüte und von Feuchtigkeitseinwirkungen während der Ernte.

Obwohl bei den Hauptuntersuchungen an Fichte das Abblühstadium der Blüte und ihre Exposition im Baum, des weiteren die Stellung des Baumes im Bestand und das Baumalter standardisiert wurden, differierten die Pollenschlauchlänge und das Keimprozent von Pollen eines Erntetermins von Individuum zu Individuum desselben

Standorts in starkem Maße. Außerdem ergaben sich Unterschiede zwischen den Erntejahren 1987 und 1988 und zwischen zwei verschieden stark geschädigten Beständen.

Das Keimprozent im wenig geschädigten Waldgebiet des FoA Fürstenfeldbruck lag signifikant geringfügig höher als im stark vom Waldsterben betroffenen FoA Sauerlach. Die Pollenschlauchlänge verhielt sich jedoch umgekehrt. Dabei war diese Differenz, obwohl deutlich, nicht statistisch absicherbar. Allerdings können diese Unterschiede offenbar nicht allein auf den Faktor "Waldsterben" zurückgeführt werden. Wie die Voruntersuchungen zeigen, beeinflussen Verschiedenheiten hinsichtlich Licht und Witterung die Pollenentwicklung so stark, daß es nicht gelingt, zuverlässige Vergleiche zwischen den beiden Beständen anzustellen.

An Arbeiten wie dieser wird häufig die Stichprobengröße kritisiert. Indessen läßt sich die Stichprobe nicht nur aus pragmatischen Gründen nicht beliebig erhöhen, bei Freilanderhebungen erhöht sich mit zunehmenden N zugleich die Zahl der beeinflussenden Faktoren.

Eher ließe sich die Frage, ob die verminderte Pollenvitalität mit dem unterschiedlichen Schädigungsgrad korreliert ist, mit einer über mehrere Jahre fortlaufenden Beobachtung beider Versuchsbestände klären. Auf diese Weise wäre auch festzustellen, ob die 1988 gegenüber 1987 erniedrigte Pollenvitalität in Sauerlach innerhalb der normalen Schwankungen liegt oder mit dem fortschreitenden Vitalitätsverlust der Untersuchungsbäume in Zusammenhang steht.

Auch die Schwankungen von Pollenschlauchlänge und Keimprozent auf individueller Ebene sind nicht mit morphologischen Schädigungen des "Spenderbaumes" verbun-

den. Die Pollenkeimung gesunder und kranker Bäume zeigten keinen signifikanten Unterschied.

Diese Feststellung trifft für Merkmale der Samen und Samenkeimung dieser Bäume im gleichen Sinn zu:

Das Keimprozent, die Keimschnelligkeit, der Vollkornanteil und das Tausendkorngewicht zeigen große individuelle Unterschiede, aber keine mit dem Entnadelungsprozent des Mutterbaums korrelierte Tendenz.

Auf große interindividuelle Schwankungen der Samenzahl pro Baum, des Tausendkorngewichts und des Keimprozentes bei *Picea abies*, die ungerichtet und unabhängig von der Schädigung auftraten, haben schon STUTZ et al. (1987) hingewiesen. Die hier vorliegenden Ergebnisse stehen damit voll im Einklang.

Darüberhinaus zeigt unsere Untersuchung, daß es in der Anzahl der Zapfen pro Baum, die als Maß für die Fruktifikationsstärke eines Baumes diene, keine Unterschiede zwischen gesunden und kranken Fichten gibt.

Deutliche Korrelationen zwischen Samenvitalität und Gesundheitszustand des Mutterbaums sind jedoch bei Freilanderhebungen nur nachzuweisen, wenn sich die Ursachen der Beeinträchtigung auf die Makrospore beschränkt. Liegt diese auch im Pollen begründet, so müssen mögliche Vitalitätsminderungen unabhängig vom Gesundheitszustand des Mutterbaumes auftreten, da bei Freilanderhebungen der Schädigungsgrad des Pollenspenders stets als unbekannter Faktor miteingeht.

Aufschluß über Störungen der Befruchtung durch Waldsterbenseinflüsse, sei es auf Pollen, Samenanlage oder beim Vorgang der Befruchtung selbst, können letztlich nur gelenkte Testkreuzungen geben (vgl. Abschn. 4.3).

Zur Interpretation der hier vorgestellten Ergebnisse kann man, schließt man sich der vorherrschenden Meinung an, wonach das Waldsterben in der Hauptsache durch luftgetragene Schadstoffe ausgelöst wird, Freilanderhebungen als eine Auswertung von Langzeitbegasungen mit unbekannten Schadstoffen ohne Kontrollbehandlung verstehen.

Eine Störung der Pollenentwicklung ist dann auf zwei Wegen denkbar: Entweder die Schadstoffe gelangen direkt und unverändert an den Ort der Pollenbildung indem sie die verharzten Knospenschuppen penetrieren, oder sie wirken indirekt, indem sie andere physiologische Prozesse (z.B. den Hormonhaushalt) so verändern, daß die Pollenentwicklung davon betroffen ist.

Erreichen die Schadstoffe den Ort der Pollenbildung direkt, so muß sich dieser Einfluß unabhängig vom Gesundheitszustandes des blütentragenden Baumes auswirken.

Eine Freilanderhebung, wie die vorliegende, die eine Art Bestandsaufnahme darstellt, kann nicht feststellen, ob der Pollen sich generell unbeeinflusst von diesen Immissionen entwickelte. Ebenso muß sie die Frage unbeantwortet lassen, ob Einflüsse, die das Waldsterben hervorrufen, zwangsläufig auch die Pollenentwicklung verändern. Wie bei allen Untersuchungen dieser Art fehlt dazu die Bezugsgrundlage, in diesem Fall die völlig ungestörte, gewissermaßen "normale" Pollenentwicklung. Die Kennwerte der Pollenkeimung eines morphologisch symptomfreien Baumes können nicht als Vergleichsbasis herangezogen werden. Damit sind die Grenzen dieser Erhebung aufgezeigt:

Nur, wenn die physiologisch-biochemischen Veränderungen durch die auslösenden Stoffe in gleichem Maße morphologische und nadelanatomische Symptome, sowie Nadelverluste bewirken, wird sich ein Zusammenhang zwischen Nadelverlust und Pollenkeimungsverhalten herstellen lassen.

Einen Zusammenhang dieser Art wurde bei der bisher einzigen an Waldbäumen durchgeführten Langzeitbegasung der Blüte festgestellt: BEDA (1982) beschreibt eine mit den vegetativen Schäden gekoppelte Pollenvitalität an *Abies alba* nach SO_2 -Begasung. Das Keimprozent der Pollen aus begasten Blüten war nur dann verringert, wenn auch die Nadeln des Triebs, an dem die Blüte inseriert war, Symptome durch SO_2 zeigten.

Anders die Ergebnisse einer Freilanduntersuchung von HOUSTON & DOCHINGER (1977): Bei ihrer Erhebung an *Pinus resinosa* und *Pinus strobus* in einem SO_2 -belasteten Gebiet war das Keimprozent der Pollen beider Baumarten gegenüber Pollen aus dem gering belasteten Vergleichsgebiet um 20% niedriger, obwohl noch keine vegetativen Schäden zu erkennen waren. Demnach kann die Pollenentwicklung schon gestört sein, wenn noch keine morphologischen Schädigungen erkennbar sind.

Das Fehlen jeglicher Einwirkung seitens des Waldsterbens läßt sich somit aus dieser Untersuchung nicht ableiten, auch wenn sich, teils weil vielfältige Einflußfaktoren zusammenwirken, kein Zusammenhang zwischen Schädigungsgrad und Pollenkeimung zeigt.

4.2 Pollenkeimungsversuche *in vitro*

Wie unter 4.1 ausgeführt, sind - gemessen an Laborbedingungen - die Verhältnisse im Freiland zu komplex, um eindeutige Ursache - Wirkung-Beziehungen abzuleiten. Aus diesem Grund wurde die Wirkung einiger Schadstoffe, die als Ursache für das Waldsterben diskutiert werden, auf die Pollenkeimung *in vitro* erprobt. Diese Untersuchungen sollten außerdem die Eignung von Nadelholzpollen als Bioindikator testen.

Die plasmatische Feinstruktur des Pollenschlauchs zeigt alle Kennzeichen einer wachsenden Zelle (LINSKENS 1967). Da die Länge des Pollenschlauchs meßtechnisch einfach zu erfassen und die Keimdauer relativ kurz ist, eignet sich die Pollenkeimung als handlicher Schnelltest, mit dem sich Hinweise auf die Wirkung von Pollutanten auf die Zellteilung und Zellstreckung nachweisen lassen.

Von der Pollenkeimung *in vitro* ist bekannt, daß sie sehr empfindlich auf physikalische und chemische Einflüsse reagiert (DÖPP 1931, STRICKLAND & CHANEY 1979, MASARU et al. 1980, VARSHNEY & VARSHNEY 1981, FEDER 1968, FEDER 1981, BEDA 1982, DuBAY & MURDY 1983a und b, KELLER & BEDA 1984, COX 1984 und 1987).

Nach VARSHNEY & VARSHNEY (1981) ist die Pollenkeimung zum Aufdecken von pflanzentoxischen Wirkungen eine weitaus sensiblere Methode als die Blattschädigung.

Als Maßstab für die Pollenvitalität wurde dabei stets das Keimprozent und/oder die Pollenschlauchlänge gewählt. Dabei darf nicht außer acht gelassen werden, daß die Pollenkeimung, obwohl der Pollen ein Organ der generativen Phase ist, auf der Streckung der vegetativen Zelle beruht, selbst also ein vegetativer Vorgang ist.

Dieser Prozess reagiert, wie die meisten pflanzenphysiologischen Vorgänge, sensibel auf Veränderungen allgemeiner Umweltbedingungen.

Als wesentlich bei der Keimung von Fichten- und Kiefernpollen erwies sich der Einfluß von Licht, Lufttemperatur und Wasser.

Dunkelkeimung ist vorteilhaft. Im Vergleich zur Keimung unter Tageslichtbedingungen waren die Keimschläuche bei Dunkelkeimung um 10% (Nordfenster, bedeckter Himmel) bis 50% (Südfenster, direkte Sonneneinstrahlung) länger. JOHNSON (1943) dagegen berichtet von einer Stimulation des Keimschlauchwachstums bei *Pinus*, *Picea* und *Quercus* durch Licht. In der vorliegenden Arbeit wurde dazu festgestellt, daß die Stimulation durch kurze elektromagnetische Wellen eng mit der Dauer der Exposition zusammenhängt.

Das Temperaturoptimum für die Pollenkeimung liegt zwischen 22-24°C. Im Freiland liegen die Temperaturen während der Pollenkeimung im Mai sehr viel niedriger. Allgemein schwanken die Umweltbedingungen *in situ* so stark, daß dadurch die Pollenkeimung mit Sicherheit beeinflusst wird.

Im Labor können diese allgemeinen ökologischen Bedingungen standardisiert werden.

Ausgehend von definierten Versuchsbedingungen lassen sich dosisabhängige fördernde und hemmende Einflüsse auf die Pollenkeimung von *Picea abies* für SO₂ und O₃ nachweisen. Hervorzuheben ist dabei, daß Konzentrationen von 36ppb SO₂ und 50ppb O₃, die einzeln appliziert zu längeren Pollenschläuchen führten als die Kontrollbehandlung, eine Hemmung des Pollenschlauchwachstums hervorrufen, wenn sie kombiniert einwirken. Synergistische Effekte der beiden Gase traten auch bei höheren Dosen auf. Als Schwellenwert, ab dem O₃ hemmend auf das Pollen-

schlauchwachstum wirkt, wurden bei diesem Experiment 100-150ppb ermittelt, für SO_2 lag der kritische Wert zwischen 60-70ppb. 1987, bei einer mit anderer Apparatur durchgeführten Begasung führten erst 150ppb SO_2 zur Beeinträchtigung der Pollenkeimung bei Fichte. Diese Differenz muß auf versuchsbedingte Unterschiede zurückgeführt werden. Möglicherweise verursacht durch Schadstoffrückhalt in den Zuluftschläuchen der Begasungsanlage 1987 oder durch abweichende Keimbedingungen.

In der vorliegenden Untersuchung zeigte sich, daß Umweltfaktoren den Einfluß von Pollutanten relativieren können. So wirkt SO_2 bei hoher Luftfeuchtigkeit offensichtlich weniger schädigend als bei trockener Luft und auf Wasseragar keimender Pollen reagiert empfindlicher auf SO_2 als auf Saccharoseagar keimender.

Die Wahl der Keimbedingungen beeinflusst die Höhe der Dosis, die eine Förderung oder Hemmung des Pollenschlauchwachstums bewirkt. Deswegen muß bezweifelt werden, daß *in vitro* ermittelte Grenzwerte auf - in der Regel abweichende - *in vivo* Bedingungen übertragbar sind.

Autoren, die versuchten, *in vitro* erzielte Effekte *in vivo* nachzuvollziehen, fanden höhere SO_2 -Toleranzen unter natürlichen Bedingungen (DuBAY und MURDY 1983a). Sie führten dies teilweise auf Pufferkapazitäten der Narbe zurück.

Auch lassen sich von der Reaktion der Pollen auf Schadstoffe keine generellen Schlüsse auf die Sensibilität der vegetativen Organe der Testpflanze ziehen. BENOIT et al. (1982) fand bei *Pinus strobus* keine Korrelation zwischen der SO_2 -Sensibilität der Pollen und der Nadeln. Wohingegen FEDER & SULLIVAN (1969) bei Petunien, Tabak und Tomate diese Zusammenhänge nachwiesen.

Außer durch die erwähnten Makropollutantien wird die Pollenkeimung auch durch organische Mikropollutantien und kurze elektromagnetische Wellen beeinflusst.

Triethylblei, das als starkes Zellgift bekannt ist, hemmt das Keimprozent von Fichtenpollen noch in einer Konzentration von $0,1 \mu\text{Mol/l}$. Von drei getesteten Chlorkohlenwasserstoffen zeigte Trichlorethen keinen Einfluß auf das Pollenschlauchwachstum und Keimprozent, während Tetrachlorethen und Tetrachlorkohlenstoff die Pollenkeimung bei 100ppm bzw. 200ppm beeinträchtigten.

Auch bestimmte organische Mikropollutantien können somit das Zellwachstum hemmen. Bei der Vielzahl der in der Luft enthaltenen organischen Substanzen (ANONYMUS 1986b) ist es erforderlich, diese Stoffe auf ihre Cytotoxizität, besonders auch im Hinblick auf synergistische Wirkungen zu testen. Die Pollenkeimung bietet sich hier als Testsystem an.

Werden keimende Pollen Radar- oder Röntgenstrahlen ausgesetzt, so zeigt sich bei kurzzeitiger Exposition (1Min.) eine Stimulation, bei längerer Exposition dagegen eine Hemmung der Pollenkeimung.

Mit der Bestrahlung durch Radarwellen ist eine Temperaturerhöhung verbunden, die jedoch bei der kurzen Expositionsdauer von 1-10Min. nachrangig sein dürfte. Die Förderung der Pollenkeimung durch Röntgenbestrahlung versucht man sich bereits bei gelenkten Kreuzungen, zum Teil auch zur Überwindung von Selbstinkompatibilität zunutze zu machen (ETI 1987).

Bei der Begasung von *Pinus sylvestris* Pollen zeigten sich erhebliche Unterschiede zwischen den einzelnen Baumindividuen. Individuelle Reaktionen auf SO_2 -Begasung sind auch von SCHOLZ et al. (1984) nachgewiesen. Eine

Fertilitätsselektion durch SO_2 ist daher möglich. Dadurch werden Allele aus dem Genpool einer Population eliminiert. Über eine derartige Veränderungen in der genetischen Struktur einer Kiefern-Population unter Immissionen berichten MEJNARTOWICZ & OKONIEWSKA (1982).

MÖLLER-STARCK (1985) teilt über immissionstolerante und sensitive Buchen mit, daß der Heterozygotiegrad der Toleranten die der Sensitiven um 30% übersteigt. Die Gesamtheit aller toleranten Buchen wies sogar den doppelten Heterozygotiegrad der sensitiven Gruppe auf. Demnach wird die Variabilität und damit die Reaktionsfähigkeit auf veränderte Umweltbedingungen, zu denen auch der anthropogene Schadstoffeintrag gehört, durch den Heterozygotiegrad einer Population bestimmt. Auch SCHOLZ berichtet über einen Zusammenhang zwischen Überlebensfähigkeit und genetischer Diversität (SCHOLZ, 1988).

Auch wenn die Fortpflanzung durch schadstoffresistentere Individuen und Pollen gewährleistet ist, könnte SO_2 somit durch selektive Schädigung der Pollen zur Genverarmung führen, was sich auf die Viabilität der Population auf Dauer nachteilig auswirken müßte.

Bisher wurde stets davon ausgegangen, daß eine Befruchtung der Samenanlage, und sei es selektiv durch Pollen mit überdurchschnittlich langen Keimschläuchen, auch unter Immissionseinfluß tatsächlich stattfindet. Ob sich, bei der im Übermaß produzierten Pollenmenge, eine Reduktion des Keimprozentages oder der mittleren PSL nicht doch auf den Befruchtungserfolg auswirkt, wurde durch einen Bestäubungsversuch mit SO_2 -behandeltem Pollen beantwortet.

4.3 Bestäubungsversuch

Unbestritten ist, daß Immissionen ab einer bestimmten Dosis das Wachstum der Pollenschläuche hemmen.

Entsprechende Aussagen beziehen sich stets auf den Mittelwert einer Stichprobe. Bei normalverteilten Häufigkeiten sind das arithmetische und das geometrische Mittel gleich. Das bedeutet genau 50% der Messungen liegen über dem angegebenen Mittelwert. Daraus ließe sich der Schluß ziehen, daß eine Reduktion des Mittelwerts für die Befruchtung keine biologische Relevanz besitzt, solange noch wenigstens ein Pollenschlauch die Mindestlänge zur Befruchtung der Samenanlage erreicht.

Nach MEJNARTOWICZ & LEWANDOWSKI (1985) reicht die Pollenschlauchlänge von 100µm bei *Pinus sylvestris* aus, um eine Befruchtung der Samenanlage zu gewährleisten. Auf einer Samenanlage befindet sich zum Zeitpunkt der Bestäubung in der Regel mehr als ein Pollenkorn. Bei *Abies alba* wurden im Durchschnitt 13 Pollen pro Samenanlage gezählt (EISENHUT 1961), bei *Taxus baccata* bis zu maximal 23 (LINSKENS (1967)). Es ist anzunehmen, daß sich die Zahl der Pollen pro Samenanlage bei Fichte nicht wesentlich unterscheidet.

Des weiteren ist anzunehmen, daß natürliche Umweltbedingungen die Pollenkeimung beeinträchtigen. In Mainächten sinkt die Temperatur durchaus noch unter den Gefrierpunkt, entspricht somit keineswegs dem Temperatur-optimum der Pollenkeimung (vgl. Abschn. 4.2) . Daß Regen große Teile der Produktion anemogamen Pollens zerstört, läßt sich leicht am sogenannten Schwefelregen, auf Wasserlachen schwimmenden Pollen, ablesen. Alles in allem reduzieren natürliche Umweltbedingungen mit Sicherheit die Pollenkeimung, möglicherweise in einem Ausmaß, daß Beeinträchtigungen durch anthropogene Schadstoffe dadurch nicht zum Tragen kommen.

Reduzieren anthropogene Immissionen während der Pollenkeimung die mittlere Pollenschlauchlänge um 10%, ist es naheliegend, anzunehmen, daß dennoch genügend Pollen auf der Samenanlage keimen, um die Befruchtung durch Pollen mit überdurchschnittlich langen Pollenschläuchen zu gewährleisten.

Der Bestäubungsversuch mit SO_2 -begasten Pollen führte jedoch zu anderen Ergebnissen: Obwohl sich die *in vitro* ermittelte PSL des vier Tage lang mit $820\mu\text{g}/\text{m}^3$ SO_2 begasten Pollen nicht vom Kontrollpollen unterschied, war bei Bestäubung mit diesem Pollen die Samenzahl pro Zapfen geringer und der Hohlkornanteil erhöht.

Autoren, die sich mit der SO_2 -Begasung von trockenem Pollen beschäftigen, heben die Widerstandsfähigkeit des trockenen Pollens gegenüber Schadgasen hervor. Als Maßstab für die Pollenvitalität diente ihnen dabei stets die *in vitro* ermittelte Pollenschlauchlänge (BONTE 1982, VARSHNEY & VARSHNEY 1981).

Ob und welche Schädigungen dabei die spermatogene Zelle erleidet, wird bei *in vitro* Keimungen, die durch Messung der Pollenschlauchlänge ausgewertet werden, nicht ermittelt. Nach den Ergebnissen dieses Bestäubungsversuchs findet jedoch eine Schädigung des Pollens statt, ohne daß sich diese in vermindertem Keimschlauchwachstum niederschlägt.

Insofern ist das Streckungswachstum der vegetative Zelle unter definierten Bedingungen zwar als Bioindikator für die Cytotoxizität von Luftschadstoffen geeignet, über die biologische Effizienz der Pollenschädigung sagt es jedoch nichts aus.

Zumindest bei der Begasung des trockenen Pollens finden offensichtlich Veränderungen auf mikromolekularer Ebene statt.

Die in der Literatur betonte Widerstandsfähigkeit von trockenem Pollen gegenüber Begasungen ist aufgrund dieser Resultate zumindest zu relativieren.

Überträgt man diese Erkenntnisse auf die Interpretation der unter 4.1 diskutierten Freilandserhebungen, so können Waldsterbenseinflüsse, die die Pollenschlauchlänge bei der *in vitro* Keimung nicht beeinträchtigen, durchaus cytologische Veränderungen hervorgerufen haben, die sich auf die Befruchtung auswirken.

Zwei Untersuchungen belegen derartige Folgen bei Schadeinwirkungen auf Pollen:

MA & KHAN (1976) und MA et al. (1973) wiesen bei *Tradescantia* Chromosomenaberrationen und Störungen der Mitose durch SO₂-Begasung nach. JACKSON & LINSKENS (1982) lösten durch Metallionen (Cr, Co, Cu, Hg, Ni, Pb, Va, Zn) unprogrammierte DNA Synthese in *Petunia* Pollen aus.

Nach den vorliegenden Ergebnissen muß davon ausgegangen werden, daß die vegetative Zelle nicht der empfindlichste Teil des Pollenkorns ist, sondern daß bei der SO₂-Begasung mit 820 µg/m³ physiologische, genetische oder cytologische Veränderungen stattfanden, die die Befruchtungsfähigkeit des Pollens massiv beeinflussen, ohne daß das Pollenschlauchwachstum in Mitleidenschaft gezogen ist.

Ohne cytologische Untersuchungen lassen sich über Schädigungen von Pollen keine Aussage treffen.

Aufschluß über die Befruchtungsfähigkeit von Pollen können letztlich nur Testkreuzungen geben.

5. Zusammenfassung

Zum einen war es Ziel dieser Arbeit einen möglichen Einfluß des Waldsterbens auf die Pollenvitalität und Fruktifikation von *Picea abies* festzustellen, zum anderen wurde die Wirkung von Mikro- und Makropollutantien, die als Ursachen des Waldsterbens diskutiert werden, auf die Pollenkeimung erforscht.

Demgemäß gliederten sich die Untersuchungen in einen experimentellen Teil und in Erhebungen im Freiland (1986-1988).

Im experimentiellen Teil wird die Pollenkeimung ausgewählter Pinaceen-Arten unter Einwirkung verschiedener Pollutantien, sowie der Befruchtungserfolg trocken SO₂-begaster Pollen von *Picea omorika* verfolgt. Die Freilanderhebungen überprüfen einen Zusammenhang zwischen Waldschäden an *Picea abies* und Merkmalen der generativen Phase, insbesondere der Pollenkeimung.

5.1 Einwirkungen ausgewählter Pollutantien auf die Pollenkeimung von Pinaceen

Für die Pollenkeimtests *in vitro* wurden physikalische und chemische Pollutantien ausgewählt, die als Ursache der Waldschäden diskutiert werden.

Zuvor wurde der Einfluß der Testbedingungen Licht, Wasser, Temperatur und einiger, dem Nährmedium zugesetzter Stoffe geklärt. Ihre Auswirkungen auf die Versuchsergebnisse führten zu einer entsprechenden Standardisierung der Versuchsanstellungen,

Im einzelnen wurden folgende Faktoren in ihrer Wirkung auf die Pollenkeimung überprüft:

- pH-Wert des Nährmediums
- Schwefeldioxid (SO₂)
- Stickstoffdioxid (NO₂)
- Ozon (O₃)
- Abgase eines Otto-Verbrennungsmotors
- Trichlorethylen
- Tetrachlorethylen
- Tetrachlorkohlenstoff

- Wasserstoffdioxid (H_2O_2)
- Triethylblei
- Elektromagnetische Wellen und Felder
 - Radarstrahlen
 - Röntgenstrahlen
 - Ultrakurzwellen
 - UV-Licht
 - 50Hz Hochspannungsfeld

Dabei sind als wesentliche Ergebnisse hervorzuheben:

1. Gasförmige Makropollutanten

Bei Begasung mit O_3 und SO_2 wurde eine dosisabhängige Stimulation bzw. Hemmung des Pollenschlauchwachstums festgestellt. Die Schwellenwerte für Stimulation und Hemmung werden durch Keimmedium und rel. LF beeinflusst. Außerdem wurden artabhängige und individuelle Reaktionen festgestellt. 36ppb SO_2 und 50ppb O_3 , bewirken einzeln angewandt eine Förderung des Pollenschlauchwachstums, führten aber bei gleichzeitiger Applikation zur Hemmung des Pollenschlauchwachstums.

2. Organische und anorganische Mikropollutanten

Triethylblei wirkte noch in einer Konzentration von $0,1\mu\text{Mol/l}$ toxisch auf die Pollenkeimung, das Keimprozent von Fichtenpollen war bei dieser Verdünnung um 50% reduziert.

100ppm Tetrachlorethen in Aqua demin. hemmte die Pollenkeimung um 30%, 100ppm Trichlorethen bzw. 100ppm Tetrachlorkohlenstoff dagegen nicht. Der Agarlösung beigegeben, bewirkte sowohl 200ppm Tetrachlorkohlenstoff wie auch 200ppm Tetrachlorethen verringerte Pollenschlauchlängen. Für Trichlorethen dagegen war bis zu 500ppm kein Effekt feststellbar.

10ppm H_2O_2 in Aqua demin. reduzierte das Keimprozent von Fichtenpollen um 25%.

3. Elektromagnetische Wellen und Felder

Röntgenstrahlen und Radarwellen beeinflussen die Pollenkeimung in Abhängigkeit von der Expositionsdauer. Einminütige Exposition wirkt fördernd auf Keimprozent und Pollenschlauchwachstum. Längere Exposition hat eine Verminderung des Keimprozents und Verkürzung der Pollenschlauchlänge zur Folge. Dabei werden zuerst weniger vitale Pollen zerstört.

Dunkelkeimung von *Picea abies* Pollen führt zu längeren Pollenschläuchen als unter Lichteinfluß.

Für längere (3m) Wellen (UKW), sowie für ein 50Hz Hochspannungsfeld mit einer Feldstärke zwischen 2kV/m und 10KV/m ist kein Effekt nachweisbar.

5.2 Bestäubung mit SO₂-begastem Pollen

Drei, vier, sowie fünf Tage lang mit 820µg/m³ SO₂ im trockenen Zustand bei 40% rel. Luftfeuchtigkeit begaster Pollen von *Picea omorika* wurde zur künstlichen Bestäubung verwendet. Obwohl sich das Keimprozent des fünf Tage lang begasten Pollens nicht von dem der Kontrolle unterschied und die mittlere Pollenschlauchlänge im anschließenden in vitro Keimtest nur 6% unter dem Meßwert des Kontrollpollens lag, unterschied sich der Samenansatz wie folgt:

1. Pro Zapfen wurden 41% weniger Samen gebildet.
2. Der visuell als hohl erkennbare Samenanteil lag um 31%, der im Röntgenbild ermittelte Anteil hohler Samen um 19% höher. Insgesamt wurde bei der begasten Probe ein Hohlkornanteil von 67% gegenüber 30% bei der Kontrolle ermittelt.
3. Das Tausendkorngewicht betrug bei der Kontrolle 3,6g, bei der 5 Tage lang begasten Probe 3,0g.

Bei den drei und vier Tage lang exponierten Proben wichen die genannten Merkmale geringfügiger, teils individuell unterschiedlich, in der Tendenz jedoch gleichbleibend von der Kontrolle ab.

5.3 Freilanderhebungen

Als Stichprobe für die Pollenkeimung dienten 1987 26 ca. 100j. Fichten aus zwei oberbayrischen Forstämtern.

1988 wurde die Aufnahme an 25 Individuen des Forstamts Sauerlach wiederholt. Voraus gingen Untersuchungen über die Variabilität der Pollenkeimung in Abhängigkeit von Standort, Kronenexposition, Reifestadium der Blüte und Witterungseinfluß bei der Ernte, sowie der Erntemethode selbst.

Aus methodischen Gründen war ein Vergleich zweier unterschiedlich stark vom Waldsterben betroffener Bestände nicht möglich. Die Untersuchungen beschränken sich daher auf Beziehungen zwischen dem individuellen Schadgrad und der Pollenkeimung des Einzelbaums. Zusammenhänge zwischen Waldschäden und Keimprozent bzw. Pollenschlauchlänge waren bei *Picea abies* nicht festzustellen.

Auch zwischen Zapfenzahl pro Baum bzw. zwischen der Vitalität der produzierten Samen ließ sich keine Korrelation mit dem Gesundheitszustand des Mutterbaums herstellen.

6. Literatur

- ANONYMUS (1982) Radio- und Mikrowellen als mögliche Ursache von Waldschäden.
Schriftenreihe Umweltschutz 44, Bundesamt f. Umweltschutz Bern
- ANONYMUS (1986a) Waldschäden durch Luftverunreinigungen genetische und züchterische Aspekte.
Forschungsvorhaben im Inst. f. Forstgenetik u.-pflanzenzüchtung d. Bundesforschungsanstalt f. Forst- u. Holzwirtschaft
- ANONYMUS (1986b) Identifizierung organischer Luftinhaltsstoffe als mögliche Mitverursacher von Waldschäden.
Ber. zum Forschungsvorhaben; Lehrstuhl f. Ökologische Chemie und Geochemie d. Univ. Bayreuth
- ANTIPOV, V.G. (1957) Die Wirkung der Gase von Industriebetrieben auf den Samen von Bäumen und Büschen.
Bot. J. 42,8:1230
- ANTIPOV, V.G. (1968) Einfluß von Rauch und Gas auf das Blühen und Fruchten einiger Bäume und Sträucher.
Sammelbl. Bot. Arbeiten, 2:167
- ANTIPOV, V.G. (1970) The effect of SO₂ on the reproductive organs of woody plants. Abstract in:
For. Abstr. 32:752
- ARNDT U. (1981) Auftreten und Wirkung gasförmiger Luftverunreinigungen in Waldgebieten Baden-Württembergs.
VDI-Bericht Nr. 500, 249-255
- ARNDT U. (1984) Über die Wirkung von Flourimmissionen auf die Vegetation.
Haustechnik, Bauphysik, Umwelttechnik 105,6
- ARNDT U. (1985) Ozon als möglicher Verursacher von Waldschäden.
Bericht d. 1. Statuskoll. PEF Karlsruhe 5-7.3.1985, S.145-162
- ARNDT U., SEUFERT G., NOBEL W. (1982) Die Beteiligung von Ozon an der Komplexkrankheit der Tanne (*Abies alba* Mill.) - eine prüfenswerte Hypothese.
Staub-Reinhalt. Luft 42 (6): 243-247
- ASHMORE M., BELL N., RUTTER J. (1985) The Role of Ozone in Forest Damage in West Germany.
AMBIO 14: 81-87

- BACHMANN P. HAGGENMÜLLER O. (1985) Einfluß der neuartigen Waldschäden an Altbuchen auf die Qualität ihrer Bucheckern.
Dipl.arbeit am Lehrstuhl f. Waldbau der LMU München
- BARANSKI, CZERSKI (1976) Biological effects of microwaves.
Dowden, Hutchinson and Ross: Stroudsburg
- BARTELS, H. (1986) Morphologische Kriterien der neuartigen Waldschäden. Beiträge zum IMA Querschnittseminar vom 2.-4.Dez. 1985 in der Kernforschungsanlage Jülich: 318-321
- BEDA, H. (1982) Der Einfluß einer SO₂-Begasung auf Bildung und Keimkraft des Pollens von Weißtanne, *Abies alba* (Mill.).
Eidg. Anst. forstl. Versuchsw. Mitt. 58 2, 165-214
- BENNER W. (1985) Oxidation of SO₂ in Fog Droplets by Primary Oxidants.
Atm. Env. 19, 8: 1377-1383
- BENOIT L.F.; SKELLY, MOORE, DOCHINGER (1982) The influence of ozone on *Pinus strobus* L.
Can. J. For. Res. 13: 184-187
- BINDER W.D.; BALLANTYNE D.J. (1975) The respiration and fertility of *Pseudotsuga menziesii* (Douglas fir) pollen
Can. J. Bot. 53, 9: 819-823
- BMI (1983) Hrsg. Was Sie schon immer über Luftreinhaltung wissen wollten.
Stuttgart, Kohlhammer Verlag
- BMI (1984) Dritter Immissionsschutzbericht der Bundesregierung.
Deutscher Bundestag, 10. Wahlperiode, Drucksache 10/1984
- BONTE J. (1982) Effects of air pollutants on flowering and fruiting. in: Unsworth & Omrod (eds.)
Butterworth, London, Boston, Sydney
- BOSCH, C. (1983) Ernährungskundliche Untersuchungen über die Erkrankung der Fichte (*Picea abies* Karst.) in den Hochlagen des Bayerischen Waldes.
Dipl.arbeit Lehrstuhl f. Bodenkunde, Forstwiss. Fak. d. LMU München
- BRANSCHIEDT, P. (1930) Zur Physiologie der Pollenkeimung und ihrer experimentellen Beeinflussung.
Planta 11: 368-456

- BREWBAKER, J.L.; KWACK (1963) The essential role of calcium ion in pollen germination and pollen tube growth
Am. J. Bot. 50: 859-865
- BRODEUR, P. (1980) Mikrowellen - die verheimlichte Gefahr.
Pfriemer Verlag München
- BUCHER (1975) Zur Phytotoxizität der nitrosen Gase.
Schweiz. Zeitschr. f. Forstw. 126, 5:
S. 373-391
- BURSCHEL, P.; EL KATEB, BACHMANN, HAGGENMÖLLER (1986)
Waldschäden und Bucheckernqualität
AFZ 28, 700-702
- CAVERS & STEELE (1984) Patterns of Change in Seed Weight over Time
on Individual Plants
Am. Naturalist 124, 3: 324-335
- CHANEY, STRICKLAND (1984)
Relative Toxicity of Heavy Metals to Red
Pine Pollen Germination and Germ Tube
Elongation
J. of Env. Qual. 13, 3
- O'CONNOR C.J., ASHFORD K.P., SPEDDING D.J., (1987)
Germination and Metabolism of *Pinus radiata*
Pollen in the Presence of Sulfur Dioxide
J. Plant Physiolog. 126, 373-378
- COX R.M., (1983) *In vitro* Sensitivity of Pollen to simulated
Acid Rain
New Phytol. 95: 269-276
- COX R.M. (1984) Sensitivity of forest plant reproduction to
long range transported air pollutants.
New Phytol. 97: 63-70
- COX R.M. (1985a) *In vitro* and *in vivo* Effects of Acidity and
Trace Elements on Pollen Function
Proc. of the Internat. Conference on
Biotechn. & Ecology of Pollen 9-11.7.1985
Univ. of Massachusetts Springer Verlag 1986
- COX R.M. (1985b) The response of plant reproductive
processes to acidic rain and other air
pollutants. In: Hutchinson, T.C.; Meema
K.M. (eds.) Effects of Atmospheric
Pollutants on Forests, Wetlands and
Agricultural Ecosystems.
Ecolog. Sci. Series G 16, Springer Verlag
London, Paris
- COX R.M. (1988) The sensitivity of pollen from various
coniferous and broad-leaved trees to
combinations of acidity and trace metals.
New Phytol. 109: 193-201

- DENGLER, SCAMONI (1939) Über die Keimungsbedingungen von Waldbaumpollen
Zeitschr. f. Forst-u.Jagdsw. 71,1:1-39
- DICKSON & CALDWELL (1978) Leaf development of *Rumex patens* L. (Polygonaceae) exposed to UV irradiation (280-320nm)
Am. J. Bot. 65: 857-863
- DIPROSE, BENSON (1984) The Effect of Externally Applied Electrostatic Fields, Microwave Radiation and Electric Currents on Plants and other Organisms, with Special Reference to weed control
Bot. Rev. 50,2: 171-223
- DIXON, W.J. (1985) BMDP Statistical Software.
Univ. of Calif. Press;
Berkeley, Los Angeles, London
- DÖPP, W. (1931) Über die Wirkung der schwefligen Säure auf die Blütenorgane
Ber. Deut. Bot. Ges. 47: 173-221
- DONG, P.H. (1986) Wie genau läßt sich der Nadelverlust durch Zählung der grünen Nadeljahrgänge bestimmen? Allg. Forst-u.J.Ztg., 157,2: 41-43
- DUBAY, D.T. MURDY (1983a) The impact of sulphur dioxide on plant sexual reproduction: *In vivo* and *in vitro* effects compared.
Environ. Qual. 12: 147-149
- DUBAY, D.T.; MURDY (1983b) Direct adverse effects of SO₂ on seed set in *Geranium carolinianum* L.: a consequence of reduced pollen germination in the stigma.
Bot. Gaz 144,3: 376-381
- EHRENBERG, S.C. (1986) Statistik oder der Umgang mit Daten
VCH Weinheim
- EISENHUT G. (1961) Untersuchungen über die Morphologie und Ökologie der Pollenkörner heimischer und fremdländischer Waldbäume
Forstwiss. Forsch. 15: 7-68
- ELSTNER (1984) Pflanzentoxikologie. Der Einfluß von Schadstoffen u. Schädwirkungen auf Pflanzen
Bibliographisches Institut
Mannheim/Wien/Zürich
- ETI, S. (1987) Über das Pollenschlauchwachstum und die Entwicklung der Samenanlagen in Beziehung zum Fruchtansatz und zur Fruchtqualität bei der Mandarinenorte 'Clementine' (*Citrus reticulata* Blanco)
Diss. der Univ. Hohenheim, Fak. Agrarwissenschaften

- FAULSTICH H., STOURNARAS CH. (1984)
Verursacht Triethylblei unsere Waldschäden?
Naturwiss. Rundschau 37,10: 398-401
- FAULSTICH H., STOURNARAS CH. (1985)
Potentially toxic concentrations of
triethyl lead in Black Forest rainwater
samples.
Nature 317,24: 714
- FEDER, W.A (1968) Reduction in tobacco pollen germination and
pollen tube elongation induced by low
levels of ozone.
Sci 160: 1122
- FEDER, W.A. (1981) Bioassaying for ozone with pollen systems.
Environ. Health Perspect 37: 117-123
- FEDER W.A.; SULLIVAN F. (1969) Differential susceptibility of
pollen grains to ozone injury.
Phytopath. 59: 399
- FLÜCKIGER, BRAUN, OERTLI (1978)
Einfluß verkehrsbedingter Luftverunreinigungen auf die Keimung und das Schlauchwachstum bei Pollen von *Nicotiana sylvestr.*
Env. Poll. 16, 73-80
- FOSTER, GUY (1986) The Microwave Problem
Sci. Am. 255, 3; 28-35
- FOWLER D.P. (1965) Effects of inbreeding in red pine, *Pinus resinosa* Ait.
Silvae Genet. 14: 37-46
- FRANK H.; FRANK W. (1986)
Ursachen für neuartige Baumschäden?
Photoaktivierung luftgetragener
Chlorkohlenwasserstoffe
Nachr. Chem. Tech. Lab. 34,1
- FRANK H.; FRANK W. (1987) Chlorierte Kohlenwasserstoffe-Ursache
des Baumsterbens?
Die Zeit 8 vom 13.2.1987
- FRANK H. (1988) Trichloressigsäure im Boden: eine Ursache
neuartiger Waldschäden
Nachr. Chem. Tech. Lab. 36,8:889
- FREIBOTH (1986) Unveröffentlichte Abschlußarbeit der
wissenschaftlichen Einrichtung Elektronik
und Radar Universität der Bundeswehr,
München
- FRÖHLICH, H.J (1964) Pollenbank und Pollenkeimung.
Forst-u. Holzwirt 19, 9; 200-203

- FRÖHLICH, H. (1980) The biological effects of microwaves and related questions.
Adv. Electronics Electron. Phys. 53:83-152
- GAFFNEY, J. S.; STREIT, SPALL, HALL (1987)
Beyond acid rain
Environ. Sci. Technol. 21,6:519-524
- GANDHI, O.P.; HAGMANN, HILL, PARTLOW, BUSH (1980)
Millimeter wave absorption spectra of biological samples.
Bioelectromagnetics, 1:285-298
- GARSED & RUTTER (1984) The effects of fluctuating concentrations of sulphur dioxide on the growth of *Pinus sylvestris* L. and *Picea sitchensis* (BONG.).
New Phytol. 97:175-195
- GAUDLITZ (1983) Untersuchungen zur Diagnose und Charakterisierung von Tannenbastarde.
Diss. d. Forstwiss. Fak. LMU München
- GEBUREK & SCHOLZ (1984) Über Selektionswirkungen bei Forstpflanzenpopulationen infolge von Luftverunreinigungen
Tagung der AG Forstgenetik -u.- pflanzenzüchtung 9-12.10.1984 in Göttingen
- GELLINI, PANTANI, GROSSONI, BUSSOTTI, BARBOLANI, RINALLO (1985)
Further Investigation on the causes of disorder of the coastal vegetation in the park of San Rossore (central Italy).
Eur. J. For. Path. 15: 145-157
- GRIESHAMMER (1987) Unveröffentlichte Abschlußarbeit der wissenschaftlichen Einrichtung Elektronik und Radar Universität der Bundeswehr, München
- HALBWACHS, G. (1979) Stickoxide - Wirkungen auf Pflanzen und Grenzwertproblematik.
Stickstoffoxid-Symposium 7-8 Juni 1979 Graz
- HAMID & BADOOR (1973) The effects of microwaves on green algae,
J. Microwave Power, 8:267-273
- HARRISON, FEDER (1974) Ultra-structural changes in pollen exposed to ozon.
Phytopath. 64: 257-258
- HATTEMER (1978) Bedeutung der genetischen Vielfalt der Waldbäume für die Forstwirtschaft
Forstarchiv 49:249-256
- v. HAUT & PRINZ (1979) Beurteilung relativer Pflanzenschädlichkeit organischer Luftverunreinigungen im LIS-Kurzzeittest
Staub-Reinhalt. Luft 39, 11:408-414

- HEINING, B. (1982) Untersuchungen zur Morphologie und Keimfähigkeit innerhalb der Gattung *Abies*. Dipl. Forstwiss. Fak. LMU München
- HIBBEN, TAYLOR (1975) Ozone and sulphur dioxide effects on the lilac powdery mildew fungus
Env. Poll. 9: 107-114
- HO, R.H. (1984) Seed-cone receptivity and seed production potential in white spruce
For. Ecology & Management 9:161-171
- HOLUB, OSTROLUCKA (1983) The effect of Cd^{2+} und Pb^{2+} upon pollen germination and pollen tube growth in the species of *Quercus cerris*, *Pinus nigra* und *Picea abies*.
Biologia 38 (5): 393-399
- HOLUB, ZELENKOVA (1986) Tolerance of reproductive processes of woods to the influence of heavy metals.
Ekologia (CSSR) 5 (1): 81-90
- HOMMEL, KAS (1985) Elektromagnetische Verträglichkeit des Biosystems Pflanze
AFZ 8; 172-174
- HOMMEL H., (1985) Elektromagnetischer SMOG - Schadfaktor und Streß?
Forstarchiv 56,6; 227-233
- HOOGHIEMSTRA, HARSSEMA, HOFSCHEUDER (1984) Long term concentrations of nitrogen oxides along a highway.
Sci. of Tot. Environ. 33: 113-117
- HOUSTON D.B.; DOCHINGER (1977) Effects of ambient air pollution on cone, seed, and pollen characteristics in eastern white and red pines.
Environ. Poll. 12: 1-5
- IRVING & MILLER (1981) Productivity of Field-Grown Soybeans exposed to Acid Rain and Sulfur Dioxide Alone and in Combination
J.Environ.Qual., 10,4:473-478
- JACKSON J.F.; LINSKENS H.F. (1982) Metal ion induced unscheduled DNA synthesis in *Petunia* Pollen.
Molec. Gen. Genet. 187: 112-115
- JACOBSON J.S. (1984) Effects of Acidic Aerosol, Fog, Mist and Rain on Crops and Trees
Phil. Trans. R. Soc. London 305, 327-338
- JACOBSON J.S. (1987) The Influence of Simulated Acid Rain on Vegetative and Reproductive Tissues of Cucumber (*cucumis sativus* L.)
New Phytol. 105, 139-147

- JOHNSON, L.P.V. (1943) The storage and artificial germination of forest tree pollens
Can. J. Res. 21, (Sect. C.): 332-342
Abstract in For. Abstr. 6: 8
- JONAS H. (1979) Circadian response to microwaves by *Mimosa pudica*
Z. Pflanzenphysiologie 91:91-101
- KAI, T. (1985) Aktuelle Beispiele für Synergismen und Antagonismen ausgewählter Luftschadstoffe
Diplomarbeit am Lehrstuhl für ökologische Chemie TU München/Weißenstephan
- KAMMERBAUER J. (1987) Toxische Wirkungen von Autoabgasen auf die Fichte, *Picea abies* L. Karst.
Diss. der TU München/Weißenstephan Fak. Landwirtschaft und Gartenbau
- KARNOSKY D.F.; STAIRS (1974) The effects of SO₂ on *in vitro* forest tree pollen germination and tube elongation.
J. Environ. Qual. 3: 406-409
- KELLER T.; BEDA H. (1984) Effects of SO₂ on the Germination of Conifer Pollen
Environ. Poll. (Series A) 33: 237-243
- KELLER T. (1984) Direct effects of sulphur dioxide on trees
Phil. Trans. R. Soc. Lond. 305, 317-326
- KELLY N.A. (1983) Sources and sinks of ozone in rural areas
Atm. Env. 18,7:1251-1266
- KENNEL; GAMPE (1983) Die Bayerische Waldschadensinventur 1983
Information 4/83. Bay. Staatsforstverw. Sonderheft Waldsterben. S.10-22
- KIMBROUGH R.D.; MITCHELL F.L.; HOUK V.N. (1985) Trichlorethylene: an update
J. of Tox. & Env. Health 15:369-383
- KIRK-OTHMER Enzyc. of Techn. Chem.
4. Auflage Vol. 15, S. 857
- KNABE (1978) Luftverunreinigung und Waldwirtschaft
in: OLSCHOWY (Hrsg) Natur und Umweltschutz in der BRD.
Paul Parey, Hamburg, Berlin
- KNOX, R.B. (1984) The Pollen Grain. In: Johri B.M. (ed.) Embryology of Angiosperms.
pp 197-271; Berlin: Springer Verlag
- KOZŁOWSKI T.T.; CONSTANTINIDOU H.A (1986) Responses of Woody Plants to Environmental Pollution
For. Abstr. 47,1:22-51

- KRESS L.W. (1982a) Growth impact of O_3 , NO_2 and/or SO_2 on *Pinus taeda*.
Env. Monitor. and Assess 1, 229-239
- KRESS, L.W. (1982b) Response of several eastern tree species to chronic doses of ozone and nitrogen-dioxide.
Plant Disease 66, 1149-1152
- KUNERT, K.J. (1985) Peroxidation von Membranlipiden-ein Hinweis auf physiologische Wirkungsmechanismen in geschädigten Waldbäumen.
AFZ 35, 35
- LIEDEKER H., SCHOTT P., KLEIN R.M. (1988) Symptoms of forest decline (Waldsterben) on Norway and red spruce.
Europ. J. of Forest Path. 18, 13-25
- LINSKENS, H.F. (1967) Pollen.
in: Handbuch der Pflanzenphysiologie 18;
368-406
- LINSKENS, H.F.; van MINGEN, PFAHLER, WILCOX (1985) Sulphur dioxide Effects on *Petunia* Pollen Germination and Seed Set
Bull. Environ. Contam. Toxicol. 34, 691-695
- LUNGERSHAUSEN (1987) Unveröffentlichte Abschlußarbeit der wissenschaftlichen Einrichtung Elektronik und Radar Universität der Bundeswehr, München
- LUTZ G. (1979) Vergleichende Untersuchungen über die Wuchsleistung und Qualität von Tannenbastarden im Forstl. Versuchsgarten Grafrath.
Dipl.arbeit d. LMU München, Forstwiss. Fak.
- MA T-H, KHAN H. (1976) Pollen mitosis and pollen tube growth inhibition by SO_2 in cultured pollen tubes of *Tradescantia*.
Environ. Res. 12: 144-149
- MA T-H, ISBANDI D., KHAN S.H., TSENG Y.S (1973) Low level SO_2 enhanced chromatid aberration in *Tradescantia* pollen and seasonal variation in the aberration rates.
Mut. Res. 21: 93-100
- MacLEAN (1975) Stickstoffdioxide als phytotoxische Luftverunreinigungen.
VDI-Bericht Nr. 247; 85-90

- MAIER G. (1985) Untersuchungen über die Walderkrankung im Deisenhofener, Höhenkirchner und Hofoldingener Forst.
Forst. Ber. der FVA 83 S.
- MARCET, E. (1951) Pollenuntersuchungen an Föhren (*Pinus sylvestris* L.) verschiedener Provenienz.
Diss. ETH Zürich No. 2078
- MARCET, P. (1985) Anmerkungen und Richtigstellungen zum "Baumsterben".
Zeitschr. f. Forstwesen 136, S.217-223
- MARCUCCI C.M.; FIORENTINO M., CESARI A.; FIACCADORI R. (1983) The influence of fungicides on the functioning of apple and pear pollen.
In: Mulcahy d.l.; Ottaviano E. (eds.) Pollen: Biology and Implications of plant breeding.
Elsevier Biomedical Sci. Publ. New York, Amsterdam
- MASUCH G. KETTRUP A.; MALLANT R.; SLANINA J. (1986) Effects of H₂O₂-Containing Acidic Fog on Young Trees
Intern. J. Environ. Anal. Chem., 27:183-213
- MEJNARTOWICZ & OKONIEWSKA (1982) Genetische Struktur von Kiefernpopulationen nach Einwirkungen von Industrieemissionen
Forum Genetik-Wald-Forstwirtschaft 29.9-1.10.1982 Göttingen
- MEJNARTOWICZ & LEWANDOWSKI (1985) Effects of Flourides and Sulphur dioxide on Pollen Germination and growth of Pollen Tube
Acta Soc. Bot. Pol. 54, 2 125-129
- MOHR, H. (1986) Die Erforschung der neuartigen Waldschäden.
Biologie in unserer Zeit 18, 3, 83-89.
- MOOSMAYER, H. (1986) Stand der Forschung über das Waldsterben und Fortschritte seit 1984.
AFZ 46, 1150-1153
- MÜLLER-STARCK (1985) Genetic Differences between "Tolerant" and "Sensitive" Beeches (*Fagus sylvatica* L.) in an Environmentally Stressed Adult Forest Stand
Silvae Gentica 34: 241-246
- MULCAHY D.L.; OTTAVIANO E. (eds.) (1983) Pollen: Biology and Implications for Plant Breeding
Elsevier Biomedical, New York, Amsterdam

- MULCAHY D.L.; MULCAHY G.B.; OTTAVIANO (1985)
Biotechnology and Ecology of Pollen
Springer Verlag, New York Berlin
Heidelberg Tokyo
- MURDY W.H: (1979) Effects of SO₂ on sexual reproduction in
Lipidium verginicum L. originating from
regions with different SO₂ concentrations
Bot. Gaz. 140,3: 299-303
- MURDY W.H. RAGSDALE H.L. (1980)
The influence of relative humidity on
direct sulfur dioxide damage to plant
sexual reproduction.
J. Environ. Qual. 9: 493-496
- MRKVA R. (1969) Einfluß der Immission auf die Saatgutgüte
der Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) im Gebiet
des Forstbetriebes Breclov (Südmähren).
Acta Univ. Agric. Brno 38: 345-360
- NAKADA M.; FUKUI S. & KANNO S. (1976)
Effects of exposure to various injurious
gases on germination of lily pollen.
Env. Poll. 11; 181-187
- NAKADA, M.; KATSUHISA, SANKICHI, YUTAKA (1980)
Effects of inorganic components in acid
rain on tube elongation of Camellia pollen.
Environ. Poll. A, 21,1:51-57
- NIHLGARD, B. (1985) The ammonium hypothesis: an additional
explanation to the forest dieback in
Europe. Ambio, 14, 1, S.2-8
- NORUSIS, M.J. (1986) SPSS/PC+ for the IBM PC/XT/AT.
SPSS Inc. Chicago, Illinois.
- NYGAARD O. (1971) Studies on the germination of Pine Pollen
(*Pinus mugo*) *in vitro*.
Physiol. Plant. 24:130-135
- PAECH, K.; SIMONIS, W (1952)
Übungen zur Stoffwechselphysiologie der
Pflanzen
Springer Verlag Berlin Göttingen Heidelberg
- PAYER, H.-D., BLANK L., BOSCH C., GNATZ G., SCHMOLKE W., SCHRAMMEL
P., (1986) Simultaneous exposure of forest trees to
pollutants and climatic stress
Water, Air, and Soil Poll. 31; 485-491
- PELZ, E. (1963) Untersuchungen über die Fruktifikation
rauchgeschädigter Fichtenbestände.
Arch.f.Forstw. 12, 10; 1066-1077
- PODZOROV N.V. (1965) Effects of smoke in the air and the quality
of pine seeds.
Lesn. Chozjajstvo 18: 47-49

- POPNIKOLA, N. (1971) Untersuchungen über die morphologisch-physiologischen Merkmale von Pollen der Weißtanne (*Abies alba* Mill.) in bezug auf ihre Hybridenbildung. Sumarski List, Zagreb, 95, 9/10; 291-308
- PRINZ B. (1983) Gedanken zum Stand der Diskussion über die Ursache der Waldschäden in der BRD. Forst- und Holzwirt, 38, 460-468.
- PRINZ, B. (1984) Woran sterben unsere Wälder? Umschau 84, 544-549
- PRINZ, B., KRAUSE G.H.M., JUNG K.D., (1985) Untersuchungen der LIS Essen zur Problematik der Waldschäden aus: Waldschäden - Theorie und Praxis. Auf der Suche nach Antworten, Oldenbourg Verlag München, Wien
- POPOW W.A. (1972) Zur hygienischen Beurteilung von Stickoxiden als atmosphärische Verunreinigung Gigijena; Santarija, Moskau 37
- RAJORA & ZSUFFA (1985) Pollen viability of some *Populus* species as indicated by *in vitro* pollen germination and tetrazolium chloride staining Can. J. Bot. 64: 1086-1088
- REICH & AMUNDSON (1984) Low Level O₃ and/or SO₂ Exposure Causes a Linear Decline in Soybean Yield Env. Poll. A 34, 345-355
- RICCIONI, B (1942) Il trattamento elettrico del seme di grano Istituto Italiano d'Arti Grafiche: Rom
- ROBERTS T.M. (1984) Long-term effects of sulphur dioxide on crops: an analysis of dose-response relations Phil. Trans. R. Soc. Lond. B 305, 299-316
- RÖDERER G. (1985) Umweltbelastungen durch organische Bleiverbindungen aus Autoabgasen.- Verursacht Triäthylblei Waldschäden? Mineralölrundschau 33, 9:169-177
- RÖHLE H. (1985) Ertragskundliche Aspekte der Wald-erkrankungen Forstwiss. Cbl. 104, 3: 121- 127
- RÖHLE H. (1986) Waldschäden und Zuwachsreaktion - dargestellt am Beispiel geschädigter Fichtenbestände im Nationalpark Bayer. Wald Forstwiss. Cbl. 105, 2: 115-122
- RÖMPP (1986) Lexikon der Chemie 4. Auflage Stuttgart, VCH

- ROHMEDER E.; SCHÖNBACH H. (1959)
Genetik und Züchtung der Waldbäume
Paul Parey, Hamburg, Berlin
- ROHMEDER, E. (1962) Die Bedeutung der Keimschnelligkeit bei forstlichen Samenarten
Proc. of the Intern. Seed Testing Assoc.
27,3:657-671
- ROHMEDER, E.; SCHÖNBORN, A. (1965)
Der Einfluß von Umwelt und Erbgut auf die Widerstandsfähigkeit der Waldbäume gegenüber Luftverunreinigungen durch Industrieabgase
Forstwiss. Cbl. 84:1-13
- ROHMEDER E. (1972) Das Saatgut in der Forstwirtschaft
Verlag Paul Parey Hamburg, Berlin
- ROLOFF A. (1984) Morphologie der Verzweigung von *Fagus sylvatica* L. (Rotbuche) als Grundlage zur Beurteilung von Triebanomalien und Kronenschäden.
Ber. d. Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben;3:1-25
- RUHLAND W. (1967) Hrsg. Handbuch der Pflanzenphysiologie Bd XVII
Springer, Berlin, Heidelberg, New York
- van RYN, D.M.; JACOBSON J.S.; LASOIE J.P. (1985)
Effects of acidity on *in vitro* pollen germination and tube elongation in four hardwood species
Can. J. For. Res.16, 397-400
- SACHS, L. (1978) Angewandte Statistik
Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
- v. SCHÖNBORN, A. (1984) 1. Die Beeinflussung der Wälder durch Immissionen
2. Ergebnisse 30jähriger Züchtungsarbeit zur Erhöhung der Widerstandsfähigkeit gegen Immissionen
Tagung der AG Forstpflanzenzüchtung- u.-genetik v.9-12.10.1984 in Göttingen
- SCHOLZ F. (1981) Genecological aspects of air pollution effects on northern forests.
Silva Fennica 15,4
- SCHOLZ F.; GEBUREK T. (1983) Über die Wirkung saurer Niederschläge auf die genetische Struktur von Waldbaumpopulationen
VDI-Berichte 500: 195-203

- SCHOLZ F. BERGMANN (1984) Selection pressure by air pollution as studied by isozyme-gene-systems in Norway spruce exposed to sulphur dioxide. *Silvae Geneticae* 33
- SCHOLZ F., VORNWEG A., STEPHAN B.R. (1984) Wirkungen von Luftverunreinigungen auf die Pollenkeimung
Tagung AG Forstgenetik u. -pflanzenzüchtung
9-12.10.1984 Göttingen
- SCHOLZ F. (1985) Waldschäden durch Luftverunreinigungen als Herausforderung für Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung
Forst-u. Holzwirt 40, 9; 238-247
- SCHOLZ F. (1986) Luftverunreinigungen, ein Umweltfaktor, der Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung vor neue Aufgaben stellt
AFZ 41, 1288-1294
- SCHOLZ f. (1988) Zur Bedeutung der genetischen Struktur für Waldökosysteme unter dem Einfluß von Luftverunreinigungen
Seminarreihe Genetik und Züchtung der Waldbäume am Lehrstuhl für Forstpflanzenzüchtung und Immissionsforschung München.
Vortrag vom 22.11.88
- SCHRÖTER, H.;
ALDINGER, E. (1985) Beurteilung des Gesundheitszustandes von Fichte u. Tanne nach der Benadelungsdichte.
AFZ 18,
- SCHÖTT, P. (1981) Folgt dem Tannensterben ein Fichtensterben?
Holzzentralblatt 11, 107, S.159-160
- SCHÖTT, P. (1982) Das Krankheitsbild - verschiedene Baumarten, das gleiche Symptom.
Bild d. Wissenschaft 12: 159-160
- SCHÖTT, P. (1983) So stirbt der Wald.
BLV Verlag München, 2.Auflage, 95 S.
- SCHÖTT, P.; BLASCHKE, HOLDENRIEDER, KOCH, LAG, SCHUCK, STIMM, SUMMERER (1984) Der Wald stirbt an Stress.
Bertelsmann Verlag München
- SCHÖTT, P.; BLASCHKE, H.; HOQUE, E.; KOCH, W.; LANG, K.J.; SCHUCK, H.J. (1983) Erste Ergebnisse einer botanischen Inventur des Fichtensterbens.
Forstwiss. Ctrbl. 102, S.158-166
- SCHÖTT, P. (1985) Das Waldsterben ein Schlüsselproblem des Umweltschutzes.
Wissenschaftsmagazin der TU Berlin 8:30-34

- SCHÜTT, P.; COWLING, E. (1985) Waldsterben, a general decline of forests in central Europe: Symptoms, development and possible causes. *Plant Disease*, 69, 7, S.548-558
- SCHÜTT, P.; LANG, K.J.; DOTZLER, M.; HOLDENRIEDER, O. (1987) Waldbäume unter der Einwirkung von Witterungsextremen und Immissionen. Der Einfluß von O₃ und SO₂ auf parasitische Pilze und die Prädisposition junger Fichten (*Picea abies* L. Karst.) *Proc. Symp. Klima und Witterung in Zusammenhang mit den neuartigen Waldschäden* 13./14.Okt.1986 GSF Bericht 10/1987 :77-94
- SCHULTE-UEBBING (1985) Stress- und Resistenzmangelsyndrom durch technische Mikrowellen? UBA Berlin, Symposium "Neue Ursachen-Hypothesen" 16/17.12.1985
- SIDHU S.S (1983) Effects of simulated acid rain on pollen germination and pollen tube growth of white spruce (*Picea glauca*) *Can. J. of Bot.* 61,12:3095-3099
- SIDHU S. STANIFORTH R.J. (1986) Effects of atmospheric flourides on foliage, cone and seed production in balsam fir, black spruce and larch *Can. J. of Bot.* 64, 5, 923-931
- SISSON & CALDWELL (1976) Photosynthesis, dark respiration, and growth of *Rumex patientia* L. exposed to ultraviolet irradiance (288 to 355 nm) simulating a reduced atmospheric ozone column. *Plant Physiol.* 58:563-568
- SKARBY L., SELLDEN G. (1984) The Effects of Ozone on Crops and Forests *Ambio* 13,2: 68-72
- SKEFFINGTON (1985) The Effects of Ozone ad Acid Mist on Scots Pine Saplings. *Oecologia* 65, 201-206
- SPIERINGS, f. (1971) Influence of Fumigations with NO₂ on growth and yield of tomato plants. *Neth. J. P. Path.* 77, S. 194-200
- STANLEY R.G., LINSKENS H.F. (1974) Pollen: Biology, biochemistry, management. Springer Verlag, New York, Heidelberg.
- STOURNARAS C., WEBER G., ZIMMERMANN H.P., DOENGES K.H.; FAULSTICH H. (1984) High cytotoxicity and membrane permeability of Et₃Pb⁺ in mammalian and plant cells. *Cell Biochem. & Function* 2: 213-216

- STAPEL, U. (1988) Wirkung des elektrischen Feldes von Hochspannungsleitungen auf das Wuchsverhalten von Jungfichten
Diplomarbeit d. Forstwiss. Fak. der Ludwig-Maximilians-Univ. München
- STRICKLAND R.C.; CHANEY W.R. (1979) Cadmium influences on respiratory gas exchange of *Pinus resinosa* pollen.
Physiolog. Plant. 47: 129-133
- STUTZ H.P., FREHNER E. BURKART A. (1987) Nadelverlust der Fichte und Samenqualität
Forstw. Cbl. 106: 68-77
- STYLES E.D.; SINGLA C. (1987) Pollen Tube Growth in Maize
Maydica 32: 139-150
- SULZBACH C.W.; PACK M.R. (1972) Effects of flouride on pollen germination, pollen tube growth and fruit development in tomato and cucumber.
Phytopathology 62: 1247-1253
- TAYLOR & EATON (1966) Suppression of plant growth by nitrogen dioxide.
Plant Physiol. 41, S.132-135
- TAYLER, THOMPSON, TINGEY & REINERT (1979) Oxides of Nitrogen Kap 6 in MUDD & KOZLOWSKI: Responses of Plants to air pollution. S.121-139
- TELL & JANES (1976) Broadcast radiation: a second look.
In: Johnson, C.C. & Shore (eds.) Biological effects of electromagnetic waves. Pp 363-388. US-Department of Health, Education & Welfare, Washington
- TEVINI & IWANZIK (1982) Untersuchungen über den Einfluß erhöhter UV-B-Strahlung auf Entwicklung, Zusammensetzung, Struktur und Funktion von Pflanzen
GSF BPT-Bericht 1/82
- UBA (1981) Luftreinhaltung 1981. Entwicklung, Stand Tendenzen.
Berlin, Schmidt Verlag
- ULRICH B. (1983) Versauerung der Ökosphäre
Umschau 83, 4: 114-118
- UNSWORTH M.H., HARRISON R.M. (1985) Is lead killing German forests?
Nature 317: 674

- VARSHNEY S.R.K., VARSHNEY C.I. (1981)
Effect of sulphur dioxide on pollen germination and pollen tube growth. *Environ. Poll.* 24: 87-92
- VARSHNEY C.K., GARG J.K. (1979)
Plant responses to sulfur dioxide pollution *CRC Crit. Rev. environ. Contr. (Chem. Rubb. Co.)*, 9: 27-48
- VDI (1978)
Verein deutscher Ingenieure Handbuch Reinhaltung der Luft.
Richtlinien 2309 und 2310
Düsseldorf 1978
- WARD G.S.; TOLMSOFF A.J.; PETROCELLI S.R. (1986)
Acute Toxicity of Trichlorethylene to Saltwater Organisms.
Bull. Environ. Contam. Toxicol. 37: 830-836
- WAYLAND, MERKLE, DAVIS, MENGESA, ROBINSON (1975)
Control of weeds with UHF electromagnetic fields.
Weed Res. 15:1-5
- WEIDENSAUL, D.C.; DARLING, S.L. (1979)
Effects of ozone and sulphur dioxide on the host pathogen relationship of Scotch pine and *Scirrhia acicola*
Phytopath. 69: 939-941
- WENTZEL K.F. (1963)
Untersuchungen über Saatgutqualität bei Fruchtbildung in Rauchschadensgebieten. In: Raucheinwirkungen im Gartenbau. Forschung und Beratung, Reihe C, 5. Min. ELF, Nordrhein-Westfalen.
- WERFFT R. (1951)
Über die Lebensdauer der Pollenkörner in der freien Atmosphäre.
Biolog. Zbl. 70: 354-367
- WERTHEIM F. S., CRAKER L. E. (1987)
Acid Rain and Pollen germination in Corn
Env. Poll. 48:165-172
- WHITMORE et al (1982a)
Growth effects of SO₂ and/or NO₂ on woody plants and grasses during spring and summer
Nature 300, S.55-57
- WHITMORE (1982b)
Some effects of low concentrations of SO₂ and/or NO₂ on the growth of grasses and poplar. In UNSWORTH (ed): Effects of gaseous airpollution in agriculture and horticulture.
London, Boston, Sydney: Butterworth Scientific: 483-485

- WOLTERS J.H.B. MARTENS M.J.M. (1987)
Effects of Air Pollutants on Pollen.
Bot. Review 53, 3: 372-414
- ZHANG & HOLDENRIEDER (1983) Selektivmedien zum Nachweis von
Heterobasidion annosum in Feinwurzeln.
Eur. J. of For. Path. 13, Heft 5-6: 348-359

Erklärung:

Hiermit versichere ich, daß ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Literaturangaben verwendet habe.

München, den 05.12.1988

.....
(Elke Krug)

Danksagung

Ich möchte mich bedanken bei Herrn Professor Dr. P. Schütt für die Betreuung und sein intensives Interesse am Fortgang der Arbeit. Bei Herrn Dr. K. J. Lang für klärende Gespräche und fachliche Anregungen und bei meinen Kollegen für ihre Hilfsbereitschaft. Besonders danke ich den Herren Dipl. Biol. P. Mack und Dr. H. Schill für bereichernde Diskussionen, fachliche Zusammenarbeit und die friedfertige Teilung der Arbeitsräume, die ein sehr freundschaftliches Arbeitsklima entstehen ließen.

Ohne den fachkundigen Rat von Herrn Menzinger, dem Gartenbaumeister des Forstlichen Versuchsgartens in Grafath, wäre die Durchführung des Bestäubungsversuchs nicht so problemlos möglich gewesen. Bei dieser Gelegenheit möchte ich mich auch noch einmal bei der Freiwilligen Feuerwehr Grafrath für die Rettung aus Baumnot bedanken.

Frau Dr. Gisela Eicke, Leiterin der Saatgutprüfstelle der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt München, beriet mich bei der Auswertung der Samenproben und ermöglichte die Benutzung des Röntgengeräts. Für ihre freundliche Aufgeschlossenheit bin ich sehr dankbar.

Herrn Dipl.-Ing. H.J. Riedl danke ich für sein Engagement bei der Durchführung der Begasungsversuche am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeuge der TU München.

Ich bitte um Verständnis, wenn ich nicht alle, die mir mit Rat und Tat zur Seite standen, sei es an den Forstämtern, an der Bundeswehrhochschule oder bei der Gesellschaft für Umwelt- und Strahlenforschung namentlich aufführen möchte.

Ich danke allen ganz herzlich, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre, und auch jenen durch die sie sehr viel einfacher gewesen ist.

Lebenslauf

Elke Krug	Destouchesstraße 30 8000 München 40
geboren am	20. Dezember 1959 in Schweinfurt
1966 - 1970	Besuch der Grundschule in Stadtlauringen
1970 - 1979	Besuch des Olympia-Morata-Gymnasiums in Schweinfurt
1979 - 1984	Studium der Forstwissenschaften an der Ludwig-Maximilians-Universität München
seit 01.11.1984	Doktorandin am Lehrstuhl für Forstbotanik der Universität München

